

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Mateo Kovač

ANALIZA I USPOREDBA KONCEPATA I PROTOKOLA USMJERAVANJA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

ANALIZA I USPOREDBA KONCEPATA I PROTOKOLA USMJERAVANJA ANALYSIS AND COMPARISON OF ROUTING CONCEPTS AND PROTOCOLS

Mentor: izv.prof.dr.sc. Štefica Mrvelj

Student: Mateo Kovač
JMBAG: 0246055362

Zagreb, rujan 2018.

ANALIZA I USPOREDBA KONCEPATA I PROTOKOLA USMJERAVANJA

SAŽETAK

U svrhu ostvarivanja komunikacije na mrežama koje informacije prenose modom paketa potrebni su određeni elementi mrežne infrastrukture kao i protokoli na temelju kojih će ti elementi međusobno komunicirati. U radu je opisana struktura mrežnog usmjerivača, njegova uloga u mreži, funkcije koje on obavlja te tablice koje usmjerivači koriste u svrhu provođenja postupka usmjeravanja i prosljeđivanja.

Kako bi mrežni usmjerivači mogli međusobno komunicirati jedni s drugima potrebna je implementacija protokola usmjeravanja i usmjerenih protokola objašnjenih u radu. Opisani su svi najpoznatiji algoritmi na kojima se temelji rad protokola usmjeravanja. Također su prikazane metrike koje različiti protokoli koriste u svrhu odabira optimalnog puta. Najkorišteniji protokoli usmjeravanja podijeljeni su s obzirom na to usmjerava li se promet unutar autonomnog sustava ili između više autonomnih sustava. Ti protokoli su detaljno opisani, te je na temelju zajedničkih značajki provedena komparativna usporedba.

KLJUČNE RIJEČI: mod paketa; usmjerivač; usmjeravanje; prosljeđivanje; protokol usmjeravanja; usmjereni protokoli; algoritmi usmjeravanja; metrike

SUMMARY

In order to achieve communication on a packet switched network, certain network infrastructure elements are needed with the inclusion of network protocols which will be the base of their communication. This paper describes the structure of the network router, its role in the network, the functions it performs and the tables it uses to perform routing and forwarding functions.

In order to achieve communication from one router to another, implementation of routing protocols and routed protocols is required which are both explained in the paper. The most used routing protocols are categorized based on whether they route traffic within an autonomous system or between multiple autonomous systems. These protocols are described in detail and compared to each other based on their common features.

KEYWORDS: packet switching; router; routing; forwarding; routing protocol; routed protocols; routing algorithms; metrics

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Značajke telekomunikacijske mreže	2
2.1. Komutacija	3
2.1.1. Komutacija kanala.....	4
2.1.2. Komutacija paketa.....	4
2.2. Mrežni protokoli.....	5
2.2.1. Usmjereni protokoli.....	5
2.2.2. Protokoli usmjeravanja.....	6
3. Prosljeđivanje i usmjeravanje paketa	7
3.1. Usmjerivač	7
3.2. Tablice usmjeravanja.....	8
4. Algoritmi usmjeravanja.....	11
4.1. Statički i dinamički algoritmi usmjeravanja.....	11
4.2. Algoritmi usmjeravanja s jednom ili više ruta	12
4.3. Jednorazinski i hijerarhijski algoritmi usmjeravanja	12
4.4. Usmjeravanje na izvorišnom čvoru i usmjeravanje na svim usmjerivačima	13
4.5. Algoritmi usmjeravanja unutar domene i među domenama	14
4.6. Algoritam vektora udaljenosti i algoritam stanja veza.....	15
4.7. Dijkstrin algoritam	16
4.8. Bellman-Ford algoritam	17
4.9. Floyd-Warshallov algoritam	18
5. Pregled protokola usmjeravanja	20
5.1 Metrike protokola usmjeravanja.....	20
5.2. Protokoli usmjeravanja korišteni unutar autonomnog sustava.....	21
5.2.1. <i>Routing Information Protocol</i>	21
5.2.2. <i>Interior Gateway Routing Protocol</i>	22
5.2.3. <i>Enhanced Interior Gateway Routing Protocol</i>	23
5.2.4. <i>Open Shortest Path First</i>	24
5.2.5. <i>Intermediate System to Intermediate System</i>	25
5.3. Protokoli usmjeravanja korišteni između autonomnih sustava	26
5.3.1. <i>Exterior Gateway Protocol</i>	26
5.3.2. <i>Border Gateway Protocol</i>	27
6. Komparativne značajke protokola usmjeravanja i usporedba protokola.....	29
6.1. Značajke protokola usmjeravanja.....	29

6.2. Usporedba protokola usmjeravanja	30
7. Zaključak	33
Popis literature.....	35
Popis ilustracija	38
Popis tablica	39
Popis kratica	40

1. Uvod

Razvojem modernog svijeta pojavila se sve veća potreba za stvaranjem oblika komunikacije kojim će se informacije moći slati na velike udaljenosti pri sve većim brzinama. Jedan od najkorištenijih sustava namijenjen toj svrsi je Internet odnosno globalna mreža sastavljena od više međusobno povezanih mreža.

Kako bi prijenos u takvom sustavu bio moguć bilo je potrebno osmisliti niz zahtjeva i elemenata koji će svojim međusobnim radom omogućiti korisniku efikasno i učinkovito slanje informacije. U tu svrhu osmišljen je paketski mod prijenosa informacija prema kojem se podaci dijele na niz manjih segmenata. Svakom segmentu dodaje se zaglavlje na temelju kojeg će mreža znati kako podatke dostaviti na njihovo odredište.

Temelj svake mreže, pa tako i Interneta je njezina infrastruktura u kojoj veliku ulogu posjeduje usmjerivač. Dvije glavne funkcije usmjerivača su prosljeđivanje i usmjeravanje paketa do njegovog odredišta. Međutim, kako bi usmjerivači mogli obavljati ove funkcije, bilo je potrebno definirati način na koji će usmjerivači međusobno komunicirati jedni s drugima. U tu svrhu stvoreni su protokoli usmjeravanja. Svrha ovog završnog rada jest analizirati i međusobno usporediti najpoznatije protokole usmjeravanja korištene u mrežama s paketskim prijenosom informacija. Naslov završnog rada jest: Analiza i usporedba koncepata i protokola usmjeravanja. Rad je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Značajke telekomunikacijske mreže
3. Prosljeđivanje i usmjeravanje paketa
4. Algoritmi usmjeravanja
5. Pregled protokola usmjeravanja
6. Komparativne značajke protokola usmjeravanja i usporedba protokola
7. Zaključak.

Drugim poglavljem definirat će se pojam telekomunikacijske mreže kao i njezine osnovne značajke poput infrastrukture, vrste komutacija te vrste korištenih mrežnih protokola.

Trećim poglavljem opisat će se građa osnovnog elementa mreže tj. usmjerivača, njegove funkcije usmjerivanja i prosljeđivanja te tablice kojima se služi kako bi obavio te funkcije.

Na koji način će protokol pronalaziti put do odredišta ovisit će o odabranom algoritmu usmjeravanja. Neki od poznatijih algoritma su Dijkstrin algoritam, Bellman-Ford algoritam te Floyd-Warshallov algoritam. Četvrtim poglavljem opisat će se svi algoritmi na kojima se protokoli usmjeravanja mogu temeljiti.

Peto poglavlje bit će strukturirano u tri dijela. Prvim potpoglavljem bit će navedene i opisane sve metrike koje protokol može koristiti kako bi odredio najbolji put. U druga dva potpoglavlja bit će navedeni i opisani najvažniji protokoli usmjeravanja uz to da će se jedno potpoglavlje fokusirati na protokole korištene unutar jednog autonomnog sustava, a drugo na protokole korištene između dva ili više autonomnih sustava.

U šestom poglavljju pregledavaju se značajke koje će biti korištene u svrhu usporedbe opisanih protokola. Također provest će se usporedba i analiza protokola koja će biti prikazana tablicom.

2. Značajke telekomunikacijske mreže

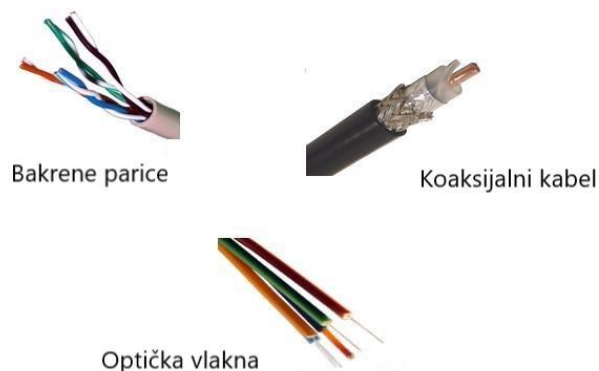
Prema [1], Telekomunikacije predstavljaju sustav ili proces prijenosa, odašiljanja ili prijema poruka, riječi, slika, zvuka te bilo kakvih drugih informacija na daljinu u obliku elektroničkih signala. Prema [2], primjeri telekomunikacijskih sustava su:

- telefonski sustavi
- radijski i televizijski sustavi
- Internet
- telegraf i drugi.

Kao tehnička osnova telekomunikacijskih sustava koriste se telekomunikacijske mreže koje predstavljaju skup međusobno povezanih tehničkih sustava i pripadajući im linkova. Svrha telekomunikacijskih mreža je pružanje komunikacijskih i informacijskih usluga krajnjim korisnicima. Osnovni elementi sustava telekomunikacijske mreže su čvorovi mreže i prijenosni mediji [1].

Prema [2], čvorišta telekomunikacijske mreže obavljaju osnovne funkcije prijenosa, prijama, skladištenja te obrade podataka. Kako bi krajnji korisnik mogao poslati ili primiti informaciju, koristi se specifična vrsta čvorova odnosno predajnici i prijammnici. Predajnik pretvara korisnikove podatke u električne signale kako bi oni mogli biti poslani putem mreže, a na odredištu prijammnik prima iste te električne signale te ih pretvara u informacije čitljive korisniku. Moguće je da jedan uređaj ujedno bude predajnik i prijammnik pri čemu on može istovremeno prenositi podatke te ih primiti npr. mobitel.

Čvorovi u mreži se povezuju spojnim vodovima odnosno odgovarajućim prijenosnim medijem i odgovarajućom električnom opremom. Postoji više vrsta prijenosnih medija kao što su bakrene parice, koaksijalni kabeli te optička vlakna, prikazani na slici 1.



Slika 1. Primjeri prijenosnih medija [3].

Telekomunikacijske mreže je moguće kategorizirati prema više kriterija od kojih su, prema [4] sljedeće kategorije:

- prema obliku informacija
- namjeni mreže
- pokretljivosti korisnika.

U kontekstu oblika informacije, telekomunikacijska mreža kategorizira se na mreže govorne komunikacije kao što je PSTN (eng. *Public Switched Telephone Network*), te na podatkovne komunikacije kao što je Internet. Govorna komunikacija predstavlja prijenos govora na velike udaljenosti, a ostvaruje se pomoću infrastrukture jednog od dostupnih operatera telefonskih mreža. S druge strane, Internet povezuje računala i računalne mreže diljem svijeta upotrebom Internetskih protokola kako bi korisnici mogli preuzimati podatke te ih međusobno razmjenjivati. U današnjim mrežama se ta dva oblika informacija objedinjuju odnosno, pojavljuju se višemedijske mreže koje omogućuju prijenos više oblika informacija uporabom jedne telekomunikacijske mreže.

U kontekstu namjene, telekomunikacijske mreže kategoriziraju se na privatne telekomunikacijske mreže i javne telekomunikacijske mreže. Javne telekomunikacijske mreže su one mreže u kojima se javno eksploatiraju telekomunikacijski resursi. Veze prema javnim telekomunikacijskim mrežama uspostavljaju se na temelju ugovornog odnosa između operatera telekomunikacijskih usluga i krajnjeg korisnika tj. fizičke ili pravne osobe koja plaća mjesečnu naknadu za usluge korištenja mreže. Privatne mreže su namijenjene ograničenom broju ljudi i one se najčešće koriste u poslovne, akademske i sigurnosne svrhe. Unatoč tome što su privatne mreže odvojene od javnih mreža, one se i dalje mogu povezivati na mreže kao što je Internet u svrhu ostvarivanja komunikacije s drugim privatnim mrežama.

Podjela telekomunikacijskih mreža prema pokretljivosti korisnika kategorizira se na fiksne telekomunikacijske mreže i pokretne telekomunikacijske mreže. Komunikacija u fiksnim odnosno žičnim mrežama se ostvaruje upotrebom komunikacijskih vodova radi čega se također ograničava korisnikova pokretljivost. S druge strane, pokretne mreže odnosno bežične mreže koriste radijski signal u svrhu prijenosa informacija, radi čega se korisnik može slobodno kretati područjem pokrivenim signalom telekomunikacijske mreže.

Nadalje, arhitektura telekomunikacijske mreže i međusobna komunikacija njezinih dijelova prikazana je pomoću osnovnog modela telekomunikacijske mreže. Njegovi dijelovi su sljedeći:

- korisnička oprema
- pristupna mreža
- jezgrena mreža.

Korisnička oprema sastoji se od korisničkih terminalnih uređaja. Prema [5], terminalni uređaji su krajnji uređaji unutar kojih se vrši pretvorba različitih vidova informacija u električne signale i obratno. Korisnici svoje terminalne uređaje izravno povezuju na pristupnu mrežu koja im daje pristup uslugama telekomunikacijskog davatelja. Preko pristupne mreže, ostvaruje se veza prema jezgrenoj mreži tj. centralnom dijelu telekomunikacijske mreže pomoću koje je moguće ostvarivanje veze prema drugim mrežama [4].

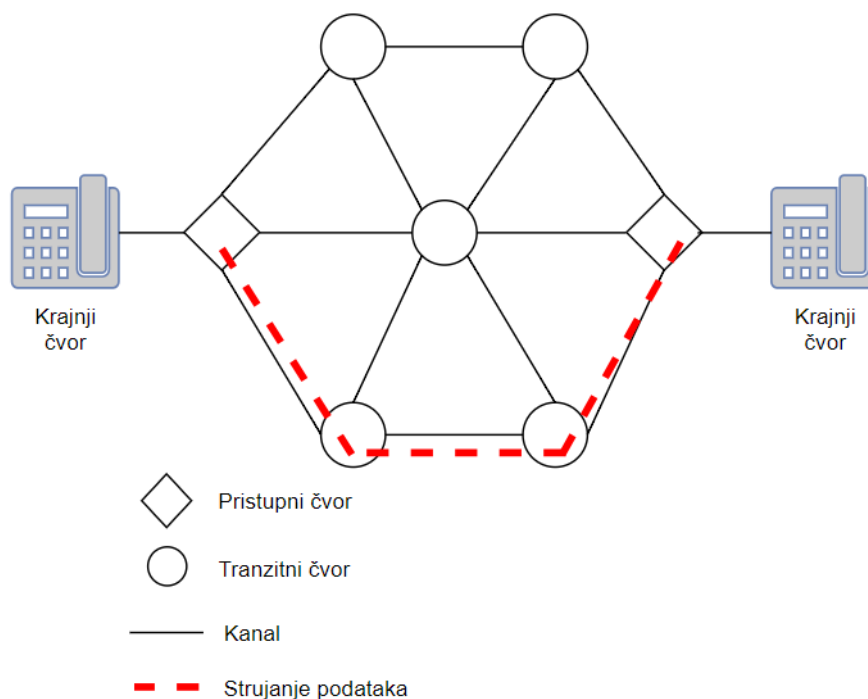
2.1. Komutacija

Osnovna funkcija koju obavljaju čvorišta telekomunikacijske mreže naziva se komutacija. Prema ITU-T, komutiranje je definirano kao uspostavljanje individualne veze, na zahtjev, od željenog ulaza do željenog izlaza dokle god to zahtijeva prijenos informacija. U tu svrhu, potrebno je ostvariti tok informacija koji može biti izveden komutiranjem kanala ili komutacijom informacijskog paketa [1].

2.1.1. Komutacija kanala

Kao što je vidljivo na slici 2, komutacijom kanala uspostavlja se jedan ili više kanala putem kojih se prenose informacijske jedinice od izvorišta do odredišta. Time se rezervira fiksni kapacitet koji je zauzet tijekom cijelog trajanja komunikacije, a koristi se u PSTN mrežama kao i u mobilnim mrežama koje su prethodile GPRS-u (eng. *General Packet Radio Service*), odnosno 2.5 generaciji s kojom se prešlo na komutaciju paketa. Glavni nedostatak ove vrste komutacije je neučinkovitost u pogledu iskoristivosti resursa odnosno resursi su zauzeti cijelo vrijeme posluživanja bez obzira na to šalje li se u nekom trenutku informacija ili ne [6].

Komutacijski čvor ovakve vrste mreže ima funkcije uspostave veze, prospajanja informacijskih jedinica te prekida veze. Prema tome postoje krajnji čvorovi koji predstavljaju početnu i odredišnu točku komunikacije kao što je terminalni uređaj, pristupni čvorovi na koje se krajnji čvorovi spajaju te tranzitni čvorovi koji posreduju u komunikaciji među krajnjim čvorovima [7]. Put po kojem će se informacijska jedinica usmjeriti izračunava se u pristupnom čvoru pomoću algoritma usmjeravanja. Na temelju izračunatog puta se uspostavlja veza prema odredištu koja može uključivati više tranzitnih čvorova koji će prosljeđivati informacijsku jedinicu do njenog odredišta. [8].



Slika 2. Proces prijenosa informacija u mreži s komutacijom kanala.

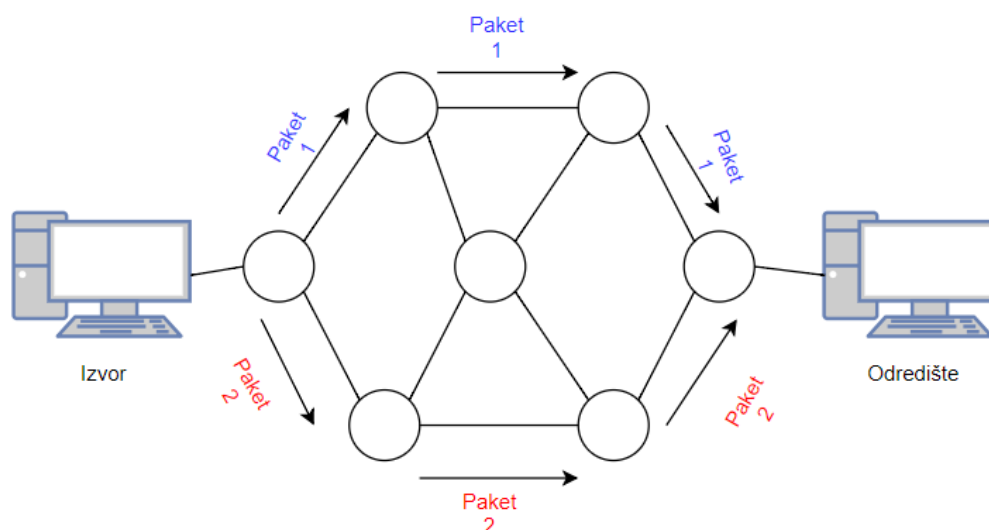
2.1.2. Komutacija paketa

Druga vrsta komutacije jest komutacija paketa prikazana na slici 3. Takvom vrstom komutacije u izvorišnom čvoru se provodi postupak paketizacije odnosno informacija se dijeli u niz manjih segmenata koji se u sklopu paketa zasebno šalju do svog odredišta. Paketi se šalju po određenom redoslijedu, ne nužno istom rutom. To rezultira različitim vremenima kašnjenja s obzirom na to da različiti putevi imaju različita opterećenja. Radi toga, paketi se numeriraju kako bi odredišni čvor znao provesti postupak depaketizacije. U odnosu na komutiranje kanala, paket zauzima resurse mreže samo za vrijeme svog prolaska tim dijelom mreže. Zbog te karakteristike moguće dijeliti resurse mreže između više korisnika odnosno aplikacija. Takva

vrsta komutiranja specifična je za Internet [9]. Prema [10], funkcije koje obavlja paketni komutacijski čvor su:

- pristupna koncentracija
- tranzitno rutiranje paketa kroz mrežu prema odredištu
- kontrola i korekcija pogrešaka
- kontrola prometnog toka/zagušenja
- klasifikacija prometnog toka i raspoređivanje kapaciteta odlaznih linkova.

Čvorovi preko svojih dolaznih linija prihvaćaju i privremeno skladište pristigle pakete u ulaznoj memoriji kako bi ih ispravno mogli svrstati u red za daljnju obradu. Nad paketima se vrši kontrola i korekcija pogrešaka u slučaju neispravnosti paketa. Zatim se primljenim i ispravnim paketima analiziraju adresni i upravljački podaci kako bi ih se moglo svrstati u redove za prijenos te dalje proslijediti do sljedećeg čvora koji je određen postupkom usmjeravanja. U svrhu teme ovog rada, naglasak će biti stavljen na mreže u kojima se informacije prenose modom paketa.



Slika 3. Proces prijenosa informacija u mreži s komutacijom paketa.

2.2. Mrežni protokoli

Jedna od glavnih uloga usmjerivača jest usmjeravanje prometa kroz mrežu što predstavlja i osnovnu problematiku ovog rada. Da bi se taj proces mogao obavljati, potrebno je koristiti mrežne protokole odnosno skupove pravila koji će određivati na koji će način dva uređaja međusobno komunicirati. Za temu ovog rada važni su protokoli usmjeravanja i usmjereni protokoli.

2.2.1. Usmjereni protokoli

Usmjereni protokoli su oni protokoli koje je moguće usmjeravati. Točnije, to su oni podaci koji se prenose između usmjerivača, a neki od tih protokola su:

- IP (eng. *Internet Protocol*)
- AppleTalk
- DECnet (eng. *Digital Equipment Corporation*)
- XNS (eng. *Xerox Network System*)
- Banyan VINES (eng. *Virtual Integrated Network Service*) [11].

Prema [12], najpoznatiji usmjereni protokol je IP protokol pomoću kojeg se odvija podatkovna komunikacija između izvorišnog i odredišnog računala. Podaci se dijele na manje blokove. Postupak slanja tih blokova, odnosno paketa, odvija se na temelju adresnih informacija skladištenih unutar zaglavlja paketa. Postoje dvije verzije ovog protokola odnosno Internet Protokol verzije 4 te Internet Protokol verzije 6. Razlika između ove dvije verzije protokola jest u veličini adresa, odnosno IPv4 koristi 32-bitnu adresu, dok IPv6 koristi 128-bitnu adresu.

IP protokol se zasniva na *Best effort* modelu prema kojem mreža ne može garantirati isporuku paketa kao ni je li usluga prijenosa udovoljila traženim kriterijima kvalitete usluge. IP protokolom se samo definiraju osnovni parametri prijenosa poput zaglavlja paketa ili adresnih informacije. U slučajevima kada se od mreže zahtjeva specifična karakteristika, kao što je primjerice veća razina pouzdanosti, koristit će se dodatni protokoli. Grupacija tih protokola se uobičajeno naziva imenom TCP/IP, a neki od tih protokola su sljedeći:

- Ethernet
- ARP (eng. *Address Resolution Protocol*)
- TCP (eng. *Transmission Control Protocol*)
- UDP (eng. *User Datagram Protocol*)
- ICMP (eng. *Internet Control Message Protocol*)
- IGMP (eng. *Internet Group Management Protocol*).

Jedni od najkorištenijih takvih protokola su TCP (eng. *Transmission Control Protocol*) protokol te UDP (eng. *User Datagram Protocol*) protokol. TCP protokol uspostavlja konekcijsku vezu kroz koju se prenosi segmentirani tok podataka. Segmentiranje i numeriranje toka podataka omogućuje kontrolu redoslijeda slanja paketa te garanciju isporuke paketa. S druge strane, pomoću UDP protokola uspostavlja se beskonkcijska veza kojom se informacije šalju u obliku datagrama bez provjere isporuke [7].

2.2.2. Protokoli usmjeravanja

Prema [11], protokoli usmjeravanja omogućuju usmjerivačima dinamičko oglašavanje i učenje dostupnih ruta prema ostalim mrežnim elementima. S obzirom na to da tih ruta može biti više, oni također omogućavaju odabir optimalne rute na temelju nekog određenog kriterija. Protokoli iz skupa IP protokola su sljedeći:

- RIP (eng. *Routing Information Protocol*)
- OSPF (eng. *Open Shortest Path First*)
- IS-IS (eng. *Intermediate System to Intermediate System*)
- IGRP (eng. *Interior Gateway Routing Protocol*)
- EIGRP (eng. *Enhanced IGRP*)
- BGP (eng. *Border Gateway Protocol*).

Navedeni protokoli usmjeravanja bit će detaljnije objašnjeni u 5. poglavlju rada.

3. Prosljeđivanje i usmjeravanje paketa

Kako je već spomenuto u prethodnom poglavlju, osnovne funkcije usmjerivača su usmjeravanje te prosljeđivanje paketa. Prema [13], usmjeravanje je postupak određivanja najboljeg puta po kojem će paketi doći od izvorišta do odredišta. Postupkom se objedinjuje niz protokola i algoritma pomoću kojih se prikupljaju i razmjenjuju podaci o mrežnoj topologiji i time stvaraju tablice usmjeravanja. S obzirom na to da se usmjeravanjem određuje cijeli put po kojem će paket putovati do svog odredišta, njega je prema [11] moguće odrediti na tri načina:

- administrator računalne mreže može sam odrediti rutu po kojoj će paketi putovati
- ruta se može odrediti slanjem probnih poruka kojima bi se provjerila optimalna ruta
- objavljivanjem poznatih ruta.

Ako se i izvorišni čvor i odredišni čvor nalaze na istoj lokalnoj mreži, tada se takvo usmjeravanja naziva direktno usmjeravanja, odnosno onda kada se nalaze na različitim mrežama naziva se indirektno usmjeravanja [14].

S druge strane, prosljeđivanje je postupak kojim usmjerivač analizira adresne informacije pristiglih paketa te ih, na temelju tablica prosljeđivanja, na odgovarajuće izlazno sučelje koje vodi do odredišta paketa [13].

3.1. Usmjerivač

Prema [15], usmjerivač je mrežni element koji omogućuje prijenos informacija između dvije ili više mreža, a radi na mrežnom sloju OSI (eng. *Open Systems Interconnection*) referentnog modela. Informacije koje se prenose u usmjerivaču prenose se u obliku paketa. U pogledu na telekomunikacijske mreže, usmjerivač predstavlja ključnu komponentu s obzirom na to da svojim funkcijama omogućava postupke usmjeravanja i prosljeđivanja paketa.

Elemente usmjerivača moguće je podijeliti na dvije kategorije, odnosno prema funkcionalnosti elemenata te prema samoj arhitekturi usmjerivača. U pogledu funkcionalnosti, postoji 6 elemenata usmjerivača:

- Mrežna sučelja, koja sadrže određeni broj priključaka preko kojih se ostvaruje veza s mrežnim linkovima.
- Mehanizam za prosljeđivanje, koji odabire mrežno sučelje prema kojem će paket biti prosljeđen.
- Upravljač redovima čekanja, koji privremeno skladišti pakete u međuspremnike onda kada prijenosni link bude zagušen. Na temelju discipline posluživanje, on može odrediti kojim redoslijedom će paketi biti posluživani.
- Upravljač prometom, koji regulira i prioritizira dolazni promet u svrhu ostvarivanja željene razine usluge.
- Sabirnica, koja omogućuje prijenos podataka s ulaznih mrežnih sučelja na izlazna mrežna sučelja.
- Kontrolni proces usmjerivača, koji je zadužen za implementaciju i provođenje protokola usmjeravanja.

Iz perspektive arhitekture usmjerivača, elementi su sljedeći:

- Port kartice, koje sadrže mrežna sučelja pri čemu je svaka port kartica sposobna upravljati samo određenom vrstom prijenosa npr. Internet ili Sonet.

- Linijske kartice, koje obrađuju zaglavlje paketa u svrhu donošenja odluka o daljnjem prosljeđivanju, redoslijedu posluživanja paketa te odbacivanju paketa u slučaju zagušenja mrežnih linkova.
- Kartice za složene arhitekture preklopnika (eng. *switch fabric cards*), koje prenose pakete s ulaznih priključnica na izlazne priključnice.
- Kartice za usmjeravanje na usmjerivačima, koje implementiraju funkcionalnosti kontrolnog procesa usmjerivača.

Podatkovni paketi se, između elemenata usmjerivača, kreću velikim brzinama, što je ključno za daljnji razvoj Interneta. Obrada paketa mora se odvijati pri velikim brzinama jer bi inače to ograničilo skalabilnost usmjerivača, a samim time i rast Interneta. Sama obrada uključuje brojne funkcije koje je potrebno analizirati kako bi se bolje mogle odrediti najkritičnije funkcije koje mogu ograničiti skalabilnost usmjerivača. Osnovne funkcije usmjerivača su:

- Validacija IP zaglavlja, pri čemu se analizira ispravnost paketa kako bi informacije mogle biti pravilno prenesene.
- Kontrola vijeka trajanja paketa odnosno TTL (eng. *Time to Live*). Prema [16], TTL je oznaka koja se zapisuje u zaglavlje paketa, a označava vijek trajanja svakog paketa odnosno maksimalan broj usmjerivača kroz koji paket može biti prosljeđen prije nego što mreža zaključi kako paket nije moguće prosljediti do njegovog odredišta. Uzrok takve situacije može biti greška u tablici prosljeđivanja radi koje bi se paket konstantno prosljeđivao u krug ne približavajući se svom odredištu. Nakon što se TTL vrijednost spusti na nulu, generira se ICMP poruka na temelju koje će IP paket biti izbačen iz mreže.
- Ponovno računanje zbroja za provjeru koje se mora provesti onda kada dođe do promjene TTL vrijednosti.
- Traženje rute koje se provodi na temelju tablica prosljeđivanja.
- Fragmentacija paketa, odnosno dijeljenje podataka na manje pakete u slučajevima u kojima veličina paketa premašuje MTU. Ovu funkciju koriste samo usmjerivači temeljeni na IPv4 protokolu. Usmjerivači temeljeni na IPv6 protokolu ne podržavaju fragmentaciju paketa. Ti usmjerivači šalju pakete koji su manji ili jednaki veličini 1280 bajta. U tom slučaju, usmjerivači su obvezni odrediti optimalni MTU prije nego što paketi budu poslani.
- Upravljanje IP opcijama što se odnosi na naznačivanje paketa koje je usmjerivač treba posebno obraditi [15].

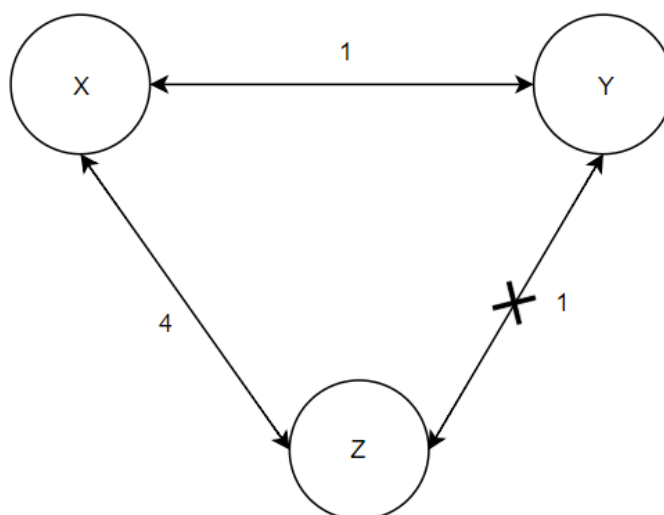
3.2. Tablice usmjeravanja

Prema [17], tablice usmjeravanja su baze podataka smještene na memoriji usmjerivača, a sadrže informacije o mrežnoj topologiji. Na temelju tih tablica se traženom odredištu dodjeljuje jedno ili više izlaznih sučelja, odnosno adresa odredišta se povezuje sa svim mrežnim čvorištima koji vode do njega. Glavna zamisao je odabir najefikasnijeg puta po kojem će paketi putovati. Informacije koje tablice mogu sadržavati su sljedeće:

- IP adresa izvorišnog usmjerivača
- IP adresa odredišnog usmjerivača
- prefiks mreže pojedine rute, odnosno dio bitova mrežne adrese koji se također naziva maska podmreže

- informacije o prioritetu odabira ruta
- ostale informacije o usmjerivaču kao što je oznaka sučelja kojeg će čvor koristiti prilikom prosljeđivanja paketa
- dinamičke značajke prema kojima se šalju paketi informacija pri čemu se to najčešće odnosi na protokole usmjeravanja.

Nadalje, tablice moraju biti dosljedne kako ne bi došlo do stvaranja beskonačnih petlji radi kojih paketi nikad ne bi bili dostavljeni svome odredištu. Slika 4. prikazuje jedan takav primjer beskonačne petlje u procesu usmjeravanja. U ovom slučaju čvorište X primilo je pakete koje je potrebno usmjeriti prema čvorištu Z. Prema ustanovljenoj tablici usmjeravanja, čvorište X je izračunalo kako je put s najmanjim troškom put X-Y-Z. Međutim veza između čvorišta Z i čvorišta Y je postala nedostupna (što je prikazano križićem na slici), radi čega će paketi biti vraćeni na čvorište X, kako bi oni mogli biti prosljeđeni putem X-Z puta. S obzirom na to da tablica usmjeravanja čvorišta X nije ažurirana, paketi će se ponovno slati prema čvorištu Y. Time će se stvoriti beskonačna petlja radi koje podaci nikada neće biti dostavljeni svome odredištu. Kao što je ranije navedeno, taj se problem rješava upotrebom TTL oznakom, kojom se paketi odbacuju nakon određenog broja usmjeravanja [18].



Slika 4. Prikaz problema beskonačne petlje.

Izvor: [19]

Stvaranje i održavanje tablica usmjerivanja je zadatak protokola usmjeravanja. Protokoli su spojeni s tablicama usmjeravanja pomoću dva specifična filtra koji imaju funkcije prihvatanja, odbijanja i modificiranje ruta. Jednom kada tablica zaprimi promjene, ponovno će izračunati puteve kako bi se te informacije mogle poslati odgovarajućim protokolima ostalim usmjerivačima mreže. Iako se uglavnom koristi jedna vrsta protokola usmjeravanja, moguće je također koristiti više vrsta protokola sličnih karakteristika [17].

Tablice se mogu održavati statički i dinamički. Statičke tablice namijenjene su za manje računalne mreže u kojima ne dolazi do velikih promjena u prometu, te njih mijenja isključivo administrator ako za to vidi potrebu. Dinamičke tablice izrađuju i održavaju protokoli usmjeravanja te su one namijenjene onim mrežama koje imaju veći opseg, te su sklone daljnjem

rastu i promjeni u strukturi. Radi toga je potrebno dinamički se prilagođavati trenutnom stanju mreže odnosno koristiti tablice koje će ‘osluškivati’ samu mrežu i njezine promjene [20].

Glavni nedostatak tablica usmjeravanja je ograničenost memorije svakog usmjerivača radi čega su one danas zamijenjene MPLS-om (eng. *Multiprotocol Label Switching*) odnosno višeprotokolarnim prospajanjem temeljenim na zamjeni oznaka.

Tom metodom se umjesto mrežnih adresa, koriste oznake u svrhu određivanja nekoliko sljedećih čvorišta po kojima će paketi putovati do svog odredišta. Svakom paketu, izvorišni usmjerivač, unosi oznaku prema kojem će svaki sljedeći usmjerivač moći odrediti kako dalje usmjeriti taj paket. Također, izvorišni usmjerivač određuje rutu po kojoj će isti taj paket putovati. Svaki sljedeći usmjerivač će time analizirati oznaku paketa, a ne cijelu adresu te jednom kada paket dođe do svog odredišta, odredišni usmjerivač će mu ukloniti zapise. Takav način usmjeravanja omogućuje bolje performanse usmjerivača s obzirom na to da se ne analiziraju potpune mrežne adrese, već pojedinačne oznake paketa [11].

4. Algoritmi usmjeravanja

Prema [21], algoritam usmjeravanja je skup postupaka koji se koriste prilikom usmjeravanja internetskog prometa. Jednom kada paket napusti izvorišni usmjerivač, postoji mnogo različitih puteva po kojem paket može putovati do svog odredišta. Upravo u tu svrhu se koristi algoritam usmjeravanja kako bi se matematički odredio najbolji put po kojem bi podatkovna jedinica došla do svog odredišta. Tri najpoznatija algoritma korištena u telekomunikacijskim mrežama su Dijkstrin algoritam, Bellman–Ford algoritam te Floyd–Warshall algoritam

Različiti algoritmi usmjeravanja koriste različite metode za određivanje najboljeg puta. Ovisno o korištenim parametrima, informacije se prikupljaju za svaki čvor kako bi se stvorila tablica usmjeravanja, te time odredio optimalni put [21].

Prema [11], daljnja podjela algoritama usmjeravanja je sljedeća:

- statičke i dinamičke
- algoritme s jednom ili više ruta
- jednorazinske i hijerarhijske
- usmjeravanje na izvorišnom čvoru i usmjeravanje na svim usmjerivačima
- unutar domene i među domenama
- algoritam stanja veza i algoritam vektora udaljenosti.

4.1. Statički i dinamički algoritmi usmjeravanja

Prema [22], statički algoritmi usmjeravanja koriste se u manjim mrežama, jednostavnijih mrežnih topologija, kod kojih se ne očekuje daljnji rast te je lako predvidjeti ponašanje mrežnih parametara. To znači da postoji ograničen broj uređaja koje je potrebno konfigurirati. Postupak usmjeravanja se izvršava se na temelju unaprijed konfiguriranih ruta, koje ručno može promijeniti samo mrežni administrator. Statičke rute se uglavnom primjenjuju u onim situacijama gdje je ograničen izbor ruta ili postoji samo jedna dostupna zadana ruta.

Unatoč tome što statički algoritmi usmjeravanja ne zahtijevaju puno resursa kao što su memorija usmjerivača i procesorska snaga usmjerivača, postoji više nedostataka kod ove vrste usmjeravanja. Prvenstveno, njih je teško implementirati u većim mrežama s obzirom na to da je u tom slučaju potrebno konfigurirati veći broj uređaja. Nadalje, samo održavanje takvih mreža može iziskivati jako puno vremena. U slučaju kvara jedne rute, mreža ne može preusmjeriti promet na drugu rutu već administrator mreže mora intervenirati te to napraviti ručno.

Iako algoritmi dinamičkog usmjeravanja obavljaju iste funkcije kao i algoritmi statičkog usmjeravanja, oni to obavljaju na puno učinkovitiji način kako mrežni administrator ne bi morao ručno preusmjeravati promet. Za razliku od statičkog usmjeravanja, gdje usmjerivači koriste unaprijed konfiguriranu tablicu usmjeravanja, algoritam dinamičkog usmjeravanja omogućuje prilagođavanje u stvarnom vremenu u svrhu preračunavanja mogućih ruta. To znači da mreža onda puno bolje podnosi promjene kao i daljnji rast mrežne topologije.

Međutim nedostaci takve vrste algoritma su kompleksnost, što dovodi do veće potrošnje resursa, kao i potrebe za implementiranjem sigurnosnih mehanizama. Sigurnosnu prijetnju predstavlja činjenica kako si usmjerivači moraju međusobno slati poruke o nastalim

promjenama tablice usmjeravanja, radi čega je potrebno implementirati specifična sigurnosna sučelja kao i sigurnosne protokole autentifikacije. Povećava se upotreba mrežnih resursa, odnosno potrebna je veća memorija usmjerivača zbog većih tablica usmjeravanja, kao i sama procesorska snaga potrebna za preračunavanje svih ruta.

4.2. Algoritmi usmjeravanja s jednom ili više ruta

Algoritmi usmjeravanja s jednom rutom, na temelju tablice usmjeravanja, pronalaze jednu optimalnu rutu po kojoj će se podaci slati do svog odredišta. Sukladno tome, promet se uvijek usmjerava na istu rutu čime se ne iskorištavaju potpuni mrežni resursi. Također, protokoli temeljeni na takvom algoritmu su vrlo neučinkoviti u situacijama zagušenja mreže.

Algoritmi usmjeravanja s više ruta stvaraju tablice usmjeravanja s više mogućih ruta čime se promet ne usmjerava na samo jednu optimalnu rutu već na više njih. Zagušeni linkovi obično rezultiraju lošom izvedbom mreže, stoga preusmjeravanje prometa na druge, manje iskorištene rute poboljšava iskoristivost mreže i uravnoteženje opterećenja.

Ova vrsta algoritma u svojim počecima temeljila se na heurističkoj metodi koja koristi višestruko usmjeravanja nazvano *Equal Cost MultiPath* (ECMP) i *round-robin* distribuciju. Time se algoritam ograničavao na odabir najkraćih ruta što je rezultiralo smanjenjem mogućnosti balansiranja opterećenja. Kako bi mogućnost balansiranja opterećenja bila što veća uvedena su dva glavna zahtjeva odnosno kvaliteta rute (duljina) i broj odabranih ruta. Što je duljina duža, to će kvaliteta rute biti bolja, međutim postoje ograničenja radi koji odabrana ruta ne smije biti predugačka. Također se ograničava broj puteva prema destinaciji iz nekoliko razloga. Prvenstveno, uspostavljanje, održavanje i prekidanje više veza može trošiti previše mrežnih resursa. Nadalje, povećava se kompleksnost sheme usmjeravanja radi čega su uvedena ograničenja koliko ruta može biti odabrano.

Stoga je u praksi poželjno koristiti što je manje moguće puteva, te istodobno smanjiti zagušenje mreže koristeći optimalnu duljinu puta [23].

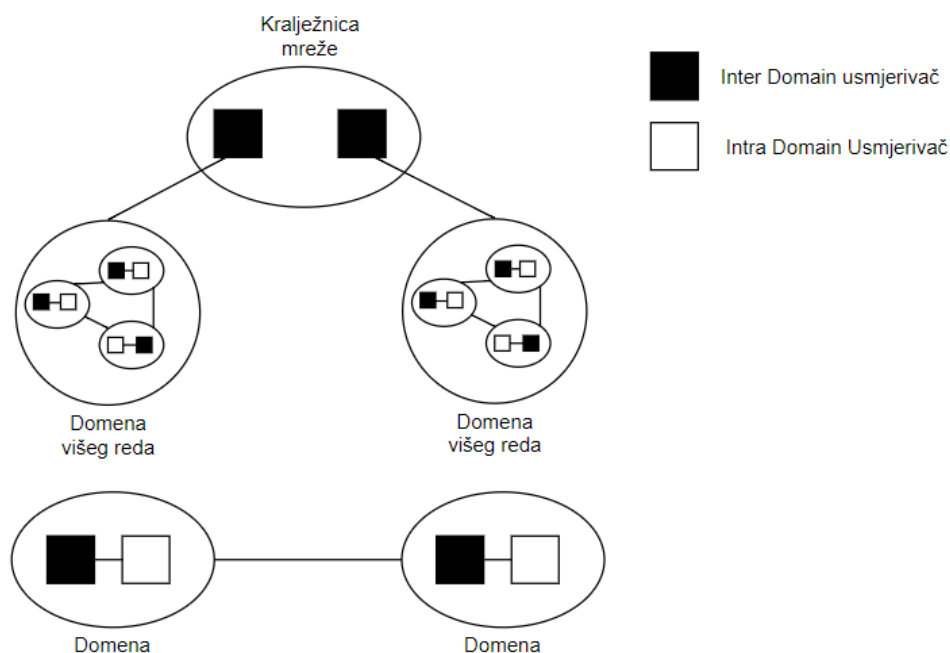
4.3. Jednorazinski i hijerarhijski algoritmi usmjeravanja

Prema [24], kod jednorazinskih algoritma usmjeravanja, svi usmjerivači su međusobno ravnopravni te su dio iste mreže. Pri tome, svi usmjerivači sadrže informacije o svakom usmjerivaču koji se nalazi u mreži. U slučaju promjena topologije mreže, potrebno je izmijeniti tablice usmjeravanja svakog čvora u mreži. To se smatra velikim nedostatkom budući da porastom mreže raste i veličina tablica usmjeravanja, a postupak ponovnog računanja ruta postane sve kompleksniji.

Kod hijerarhijskog algoritma usmjeravanja uvedena je organizacija kojom su usmjerivači grupirani po organizacijskim grupacijama. Organizacijske grupacije usmjerivača se također nazivaju i domenama unutar kojih usmjerivači mogu komunicirati samo s onim usmjerivačima koji su dio njihove domene, dok se komunikacija s ostalim usmjerivačima odvija preko jednog određenog usmjerivača. Ti usmjerivači su uglavnom oni usmjerivači s najboljim performansama pri čemu oni čine kralježnicu mreže.

Slika 5 prikazuje hijerarhijsku strukturu mreže. Skup povezanih usmjerivača unutar jednog autonomnog sustava čini jednu domenu mreže. Dvije ili više povezanih domena čini domenu višeg reda. Usmjerivači koji usmjeravaju promet unutar jedne domene nazivaju se *Intra Domain* usmjerivači, dok se usmjerivači koji usmjeravaju promet među domenama nazivaju

Inter Domain usmjerivači. Skup povezanih *Inter Domain* usmjerivača čini kralježnicu mreže kojom se povezuju domene višeg reda [25].

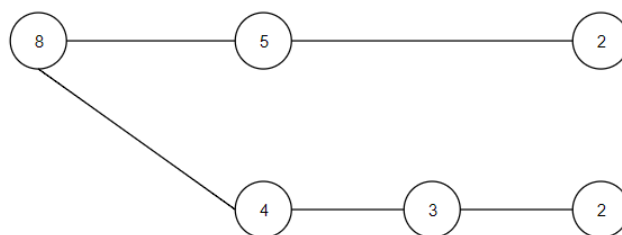


Slika 5. Struktura hijerarhije mreže.

Prednost takve vrste algoritma jest ta što organizacijska struktura mreže može biti preslika stvarne organizacijske strukture tvrtke u kojoj se mreža koristi. Time se sva komunikacija svakog pojedinog odjela odvija unutar jedne domene mreže, a za potrebe komunikacije s drugim odjelima opterećuju se samo najsposobniji usmjerivači. Nadalje, tablice usmjeravanja su puno manje, a ponovno računanje ruta tablica je manje kompleksno nego što je to kod jednorazinskog algoritma usmjeravanja [11].

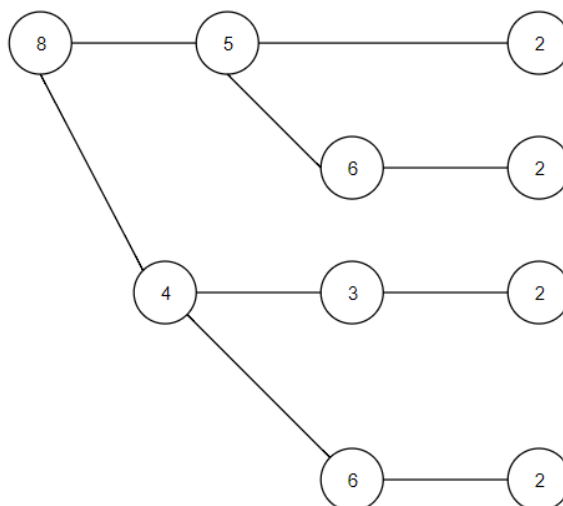
4.4. Usmjeravanje na izvorišnom čvoru i usmjeravanje na svim usmjerivačima

Prema [26], usmjeravanje na izvorišnom čvoru jest algoritam usmjeravanja na temelju kojeg se put kroz mrežu određuje u izvorišnom usmjerivaču. U tom slučaju se pretpostavlja kako izvorišni usmjerivač poznaje cijelu topologiju mreže na temelju koje bi mogao odrediti najbolji put po kojem će paketi putovati do svog odredišta. Izvorišni usmjerivač unosi u zaglavlje paketa informacije o tome kako će svaki usmjerivač usmjeriti paket jednom kada on dođe do njih. To može dovesti do određenih sigurnosnih prijetnji s obzirom na to da treća strana može prevariti usmjerivače privatnih mreža, kojima pristup putem Interneta inače ne bi bio moguć, kako bi na njih poslala zlonamjerni sadržaj. Kako bi se spriječile sigurnosne prijetnje, tim usmjerivačima se onemogućuje mogućnost prihvatanja paketa poslanih ovom vrstom algoritma. Primjer usmjeravanja na izvorištu prikazan je na slici 6 gdje samo čvor 8 ima mogućnost odabira puta.



Slika 6. Stablo usmjeravanja za par čvorova 8 (polazni čvor) - 2 (odredišni čvor) kada samo polazni čvor ima mogućnost odluke.

S druge strane kod usmjeravanja na svim usmjerivačima, svaki usmjerivač će sam odlučiti na koji način proslijediti svaki paket. U tom slučaju će paketi u svom zaglavlju sadržavati odredišnu IP adresu na temelju koje će svaki usmjerivač moći odrediti sljedeći skok. Sljedeći skok predstavlja sljedeći usmjerivač ili sljedeći mrežni prospojnik. Primjer usmjeravanja na svim usmjerivačima prikazan je na slici 7 gdje mogućnost odabira puta ima više čvorova odnosno u ovom slučaju čvorovi 8, 5 i 4.



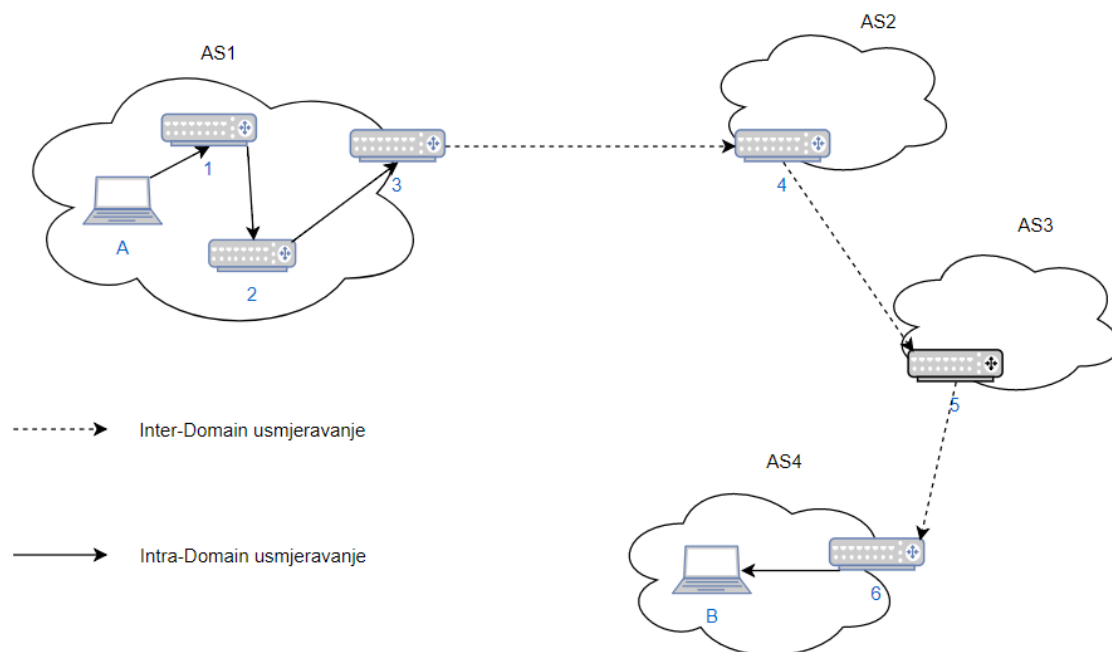
Slika 7. Stablo usmjeravanja za par čvorova 8 (polazni čvor) - 2 (odredišni čvor) kada svaki čvor ima mogućnost odluke.

4.5. Algoritmi usmjeravanja unutar domene i među domenama

Mrežne domene predstavljaju grupacije mrežnih usmjerivača. Internet se sastoji od mnogo domena od kojih svaka ima autonomnu kontrolu nad vlastitom mrežnom infrastrukturom. Takve domene se također nazivaju autonomni sustavi (eng. *Autonomous System* - AS), Postoje dvije vrste protokola ovisno o tome razmjenjuje li se promet unutar domene ili između više domena.

Prvi takav protokol je *Inter-Domain* protokol koji se koristi u svrhu razmjene prometa između više domena pri čemu svaka domena autonomno odlučuje kojim putevima će usmjeravati promet prema ostalim domenama. Primjer takve vrste protokola je *Border Gateway Protocol*. Druga vrsta protokola je *Intra-Domain* protokol koji se koristi u svrhu razmjenjivanja prometa između mrežnih elemenata koji su dio jednog autonomnog sustava. Postoji više takvih protokola kao što je *Routing Information Protocol* te *Open Shortest Path First Protocol*.

Na slici 8 prikazano je usmjeravanje unutar domene i među domenama. Računalo A komunicira s računalom B pri čemu promet putuje kroz niz numerički označenih usmjerivača. Usmjerivači od 1 do 3 su dio jednog autonomnog sustava pri čemu koriste *Intra-domain* protokole usmjeravanja. Usmjerivači od 3 do 6 koriste *Inter-Domain* protokole usmjeravanja s obzirom na to da se oni nalaze u različitim autonomnim sustavima [27].



Slika 8. Inter-domain usmjeravanje i intra-domain usmjeravanje.

Izvor: [27]

4.6. Algoritam vektora udaljenosti i algoritam stanja veza

Kod algoritma vektora udaljenosti, usmjerivač ne mora znati cijeli put kojim će se paket usmjeravati do svog odredišta. Parametri koje usmjerivač mora znati su vektor ili smjer prema kojem će se paket usmjeravati te udaljenost odredišnog usmjerivača. Svaki usmjerivač periodički distribuira cijelu ili samo neke dijelove tablice usmjeravanja svojim susjednim čvorovima. Susjedni čvorovi zatim mogu mijenjati svoje tablice ovisno o ažurnim informacijama koje su zaprimili. Takav način usmjeravanja također se naziva „*rumour routing*“ obzirom da su informacije mrežne topologije temeljene na informacijama susjednih usmjerivača. Takva vrsta algoritma najčešće se koristi prilikom usmjeravanja prometa između različitih mreža i preko Interneta.

U slučaju algoritma stanja veza, usmjerivači grade vlastitu internu kartu mrežne topologije. Svaki usmjerivač šalje poruke svim svojim susjednim čvorištima s kojim je direktno povezan, kako bi ih obavijestio jesu li njegove rute dostupni ili ne. Na temelju tih informacija susjedni čvorovi mogu pravilno ažurirati svoje tablice usmjeravanja kako bi, u slučaju usmjeravanja paketa, mogli izabrati optimalan put.

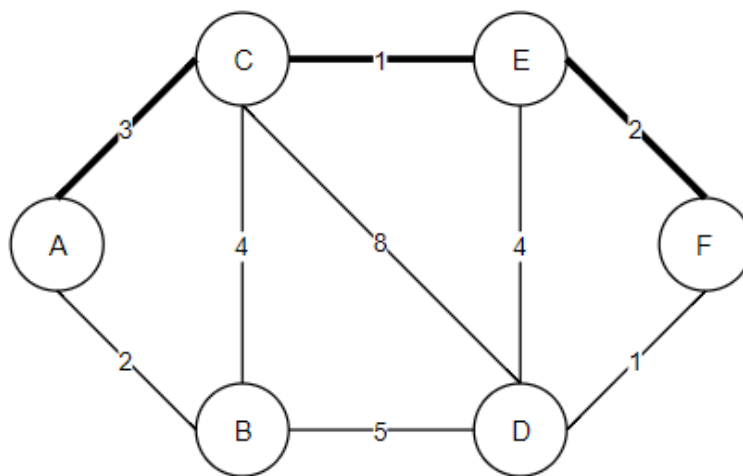
Protokoli temeljeni na ovoj vrsti algoritma brzo reagiraju na mrežne promjene. Poruke se mogu razmjenjivati onog trenutka kada dođe do mrežnih promjena, kao i u vremenskim intervalima od 30 minuta. Jednom kada određeni kanal promjeni svoje stanje, odgovarajući usmjerivač će svim svojim susjednim čvorištima poslati poruku kako bi ih obavijestio o nastaloj

promjeni. Susjedni usmjerivači će zatim ažurirati svoje tablice usmjeravanja, te dalje proslijediti poruke prema vlastitim susjednim čvorištima u mreži. Time se osigurava da svaki čvor u mreži ažurira svoje tablice kako bi one odražavale stvarno stanje mrežne topologije [28].

4.7. Dijkstrin algoritam

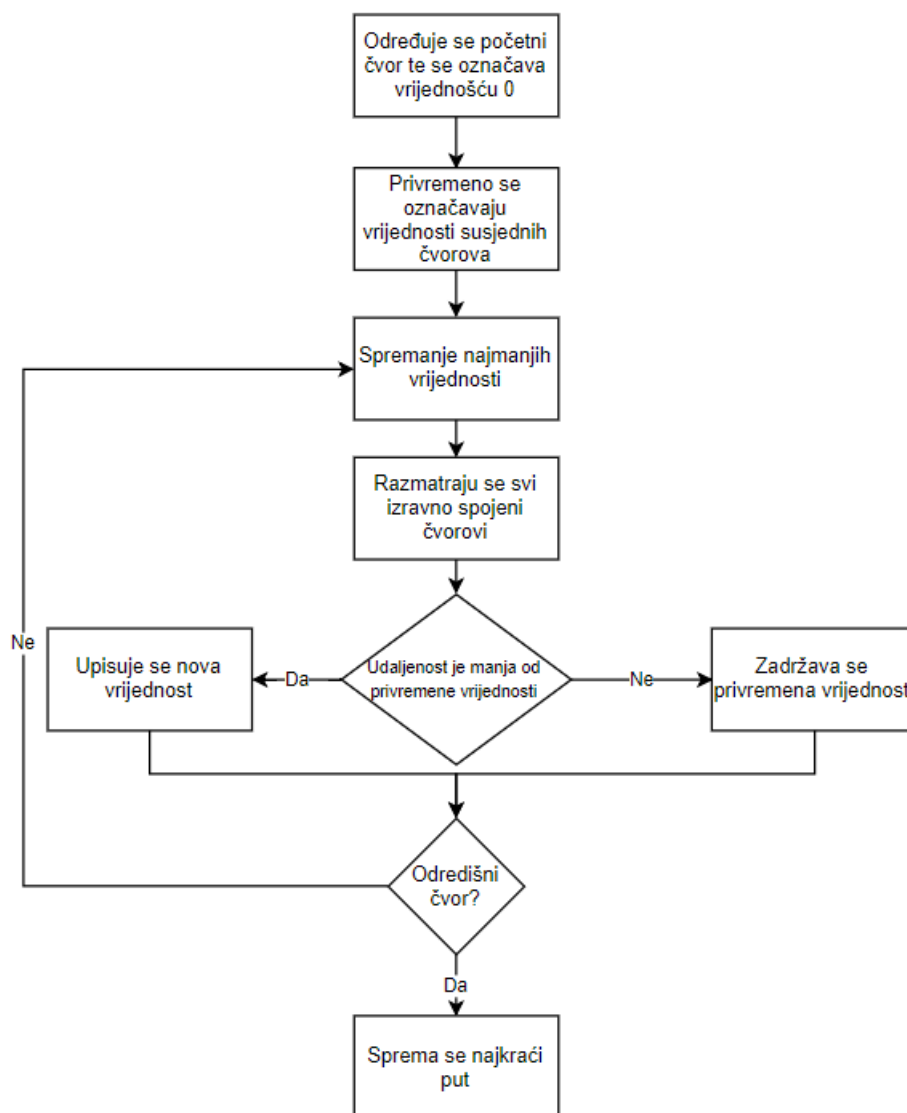
Prema [29], Dijkstrin algoritam dizajnirao je znanstvenik Edsger W. Dijkstra po kojem je algoritam također dobio i ime. Ta vrsta algoritma koristi se u svrhu pronalaženja najkraćeg puta između jednog izvorišnog čvora prema jednom odredišnom čvoru.

Način na koji algoritam funkcionira jest da se prvo odrede sva čvorišta s kojim je izvorišni čvor spojen. Nadalje, svaki link mrežne topologije karakteriziran je vrijednošću koja predstavlja udaljenost. Prilikom određivanja najkraćeg puta, algoritam će svakom čvorištu dodijeliti njegovu težinu zbrajanjem vrijednosti udaljenosti odabranih linkova. Koristeći primjer sa slike 9, u kojem je A izvorišni čvor, a F odredišni čvor, čvorištu A bi bila dodijeljena vrijednost 0, a svakom drugom čvorištu bi bila dodijeljena vrijednost beskonačno. Nakon toga algoritam odvija iteracije kojima se svakom sljedećem čvorištu dodjeljuje vrijednost zbroja udaljenosti npr. u prvoj iteraciji bi čvorištu C bila dodijeljena vrijednost 3, a čvorištu B vrijednost 2. Svakom sljedećom iteracijom bi se postupak ponovio kroz svaki neposjećeni čvor sve dok se ne bi doseglo odredište, pri čemu bi čvorištu uvijek dodjeljivali onu manju izračunatu vrijednost. Na temelju ovog primjera, najkraći put do odredišta F bi slijedio put A-C-E-F. Nedostatak takvog algoritma jest taj što algoritam pogrešno rukuje s negativnim vrijednostima udaljenosti čvorišta. Slika 10 prikazuje dijagram toka Dijkstrinog algoritma.



Slika 9. Primjer korišten u svrhu računanja najkraćeg puta koristeći Dijkstrin algoritam.

Izvor: [30]

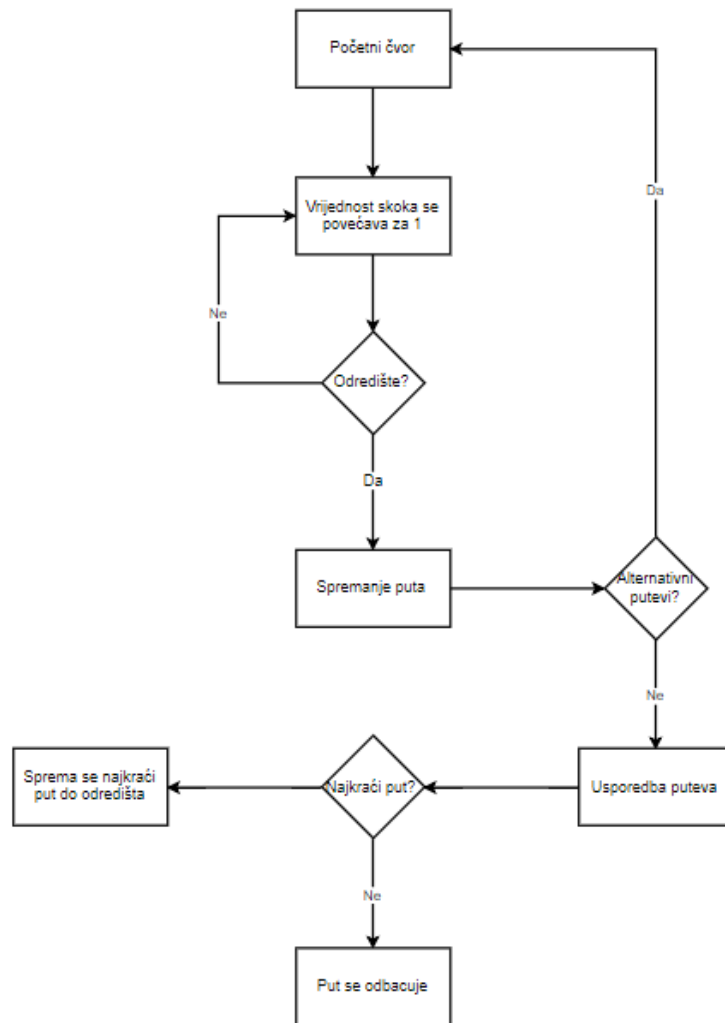


Slika 10. Dijagram toka Dijkstrinog algoritma.

4.8. Bellman-Ford algoritam

Prema [31], Bellman-Ford algoritam se također koristi u svrhu izračunavanja najkraćeg puta između dva čvorišta neke mreže. Međutim, razlika između njega i Dijkstrinog algoritma jest ta što Bellman-Ford može funkcionirati onda kada postoje negativne vrijednosti udaljenosti. U takvom slučaju, algoritam će to prijaviti i nastaviti sa svojim iteracijama tako da okonča pretraživanje na toj ruti na kojoj se nalazi negativna vrijednost.

Korištenjem ovog algoritma, usmjerivači razmjenjuju svoje potpune tablice usmjeravanja sa svim ostalim čvorovima unutar autonomnog sustava. Način na koji se tablice izgrađuju je obavljanjem onoliko iteracija koliko postoji alternativnih puteva do odredišta. Prva iteracija traži sve čvorove koji su udaljeni jedan skok od početnog čvora. Svakom sljedećom iteracijom broj skoka se povećava za vrijednost 1 sve dok se ne dosegne odredišni čvor. Informacije o putevima se zatim spremaju te uspoređuju kako bi se odredio najkraći put. Čvorovi informacije o tablicama izmjenjuju čak i onda kada se ne događaju nikakve promjene u topologiji mreže. Glavni nedostatak ovog algoritma je taj što se promjene u tablicama usmjeravanja ne odvijaju istovremeno, već se šire od jedne točke prema svim ostalima točkama. Na slici 11 prikazan je dijagram toka Bellman-Ford algoritma [32].

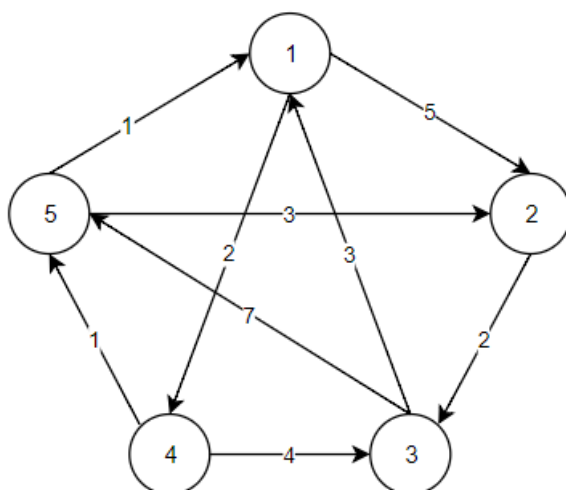


Slika 11. Dijagram toka Bellman-Ford algoritma.

4.9. Floyd-Warshallov algoritam

Floyd-Warshallov algoritam koristi se onda kada postoji više izvorišnih čvorišta radi čega je potrebno izračunati najkraću rutu do svakog čvora. Ova vrsta algoritma ne funkcionira samo u onim situacijama u kojima je rezultat konačnih petlja negativan [33].

Prema [34], algoritam pronalazi najkraći put među svim parovima čvorova usmjerenog težinskog grafa. Rezultat tog algoritma je matrica u kojoj se upisuju vrijednosti udaljenosti čvorova, dimenzija $m \times m$ gdje m predstavlja broj čvorova. Dijagonala te matrice sadrži nule, a ako među čvorovima ne postoji izravna veza, u matricu se upisuje pozitivna beskonačnost. Broj iteracija ovisi o broju čvorova, a svakom iteracijom se matrica preračunava povećavajući broj definiranog tranzitnog čvora.



Slika 12. Graf nad kojim je izvršen Floyd-Warshall algoritam.

Nultom iteracijom unose se vrijednosti samo izravno povezanih čvorova, dok se ne preostala mjesta unosi nula ili beskonačnost ovisno o situaciji. Na slici 12 nalazi se primjer grafa na kojem je obavljena nulta iteracija, a tablica 1 prikazuje nultu iteraciju.

Tablica 1. Nulta iteracija Floyds-Warshall algoritma

0	5	∞	2	∞
∞	0	2	∞	∞
3	∞	0	∞	7
∞	∞	4	0	1
1	3	∞	∞	0

Svakom sljedećom iteracijom se prolazi kroz svaki definirani čvor te se mijenjaju vrijednosti temeljem sljedeće formule:

$$D_{ij}^n = \min(D_{ij}^{n-1}, D_{ik}^{n-1} + D_{kj}^{n-1}) \quad (2)$$

Slova i i j predstavljaju čvorove čija se udaljenost prikazuje. D^n je oznaka matrice, a k oznaka definiranog tranzitnog čvora. Posljednja iteracija prikazana je tablicom 2, a prikazuje najkraće vrijednosti puteva čvorova.

Tablica 2. Posljednja iteracija Floyd-Warshall algoritma.

0	5	6	2	3
5	0	2	7	8
3	8	0	5	6
2	4	4	0	1
1	3	5	3	0

5. Pregled protokola usmjeravanja

Prema [35], protokoli usmjeravanja određuju načine kojim će usmjerivači međusobno komunicirati, raspoređujući informacije temeljem kojih će prosljeđivati pakete dalje kroz mrežu. Svaki usmjerivač skladišti informacije samo o onim mrežama s kojima je izravno povezan. U tu svrhu koriste se protokoli usmjeravanja kako bi usmjerivači mogli dijeliti informacije, prvenstveno među susjednim čvorovima, a zatim kroz cijelu telekomunikacijsku mrežu. Na osnovu tih informacija, usmjerivači stječu znanje o topologiji mreže.

S obzirom na to da je Internet podijeljen na autonomne sustave, protokole usmjeravanja je moguće podijeliti ovisno o tome usmjeravaju li se paketi unutar autonomnog sustava ili van autonomnog sustava. Također, protokoli će koristiti različite metrike u svrhu optimalnog rada.

Protokoli usmjeravanja se dijele prema tome koji algoritam koriste, a u prethodnom poglavlju su objašnjene značajke svih algoritama razvijenih za usmjeravanja prometa u telekomunikacijskim mrežama. Značajke protokola i njihova primjena bit će objašnjeni u nastavku ovog poglavlja.

5.1 Metrike protokola usmjeravanja

Prema [36], algoritmi usmjeravanja koriste različite metrike na temelju koji će odabirati najbolji put po kojem će paketi putovati do svog odredišta. Pojedini protokoli koriste više od jedne metrike, a oni su sljedeći:

- duljina puta
- pouzdanost
- kašnjenje
- kapacitet kanala
- propusnost
- opterećenje
- trošak.

Najčešća metrika korištena prilikom usmjeravanja je duljina puta. Kako bi se mogla izračunati duljina puta, protokoli omogućuju administratoru mreže dodjeljivanje proizvoljne udaljenosti svakom mrežnom linku. Time je ukupna duljina puta zbroj vrijednosti svih linkova po kojima paket putuje. Druga metoda računanja udaljenosti je na temelju broja skokova odnosno broja usmjerivača kroz koji paket mora proći do svog odredišta.

Pouzdanost se u kontekstu usmjeravanja odnosi na učestalost pogrešno prenesenih bitova (eng. *Bit Error Rate* - BER). Na temelju te karakteristike moguće je odrediti vjerojatnost da će neki mrežni link biti nedostupan, te u slučaju pada cijele mreže, koje mrežne linkove će biti lakše vratiti u funkciju rada. Ta metrika se prikazuje uz pomoć proizvoljnih numeričkih vrijednosti pomoću kojih se određuje ocjena pouzdanosti.

Kašnjenje je varijabilna vrijednost koja predstavlja potrebnu količinu vremena da paket bude premješten s izvorišnog čvora do odredišnog čvora. Izražava se u sekundama, a ovisi o različitim značajkama telekomunikacijske mreže kao što su kapacitet korištenih kanala, zagušenje mreže kao i fizička udaljenost odredišnog čvora.

Kapacitet kanala odnosi se na količinu podataka koja može proći kroz korišteni kanal u nekom danom vremenu. Prikazuje se mjernom jedinicom b/s. Iako je prilikom usmjeravanja poželjno da ova metrika bude što veća, ona sama po sebi ne može garantirati kako je izabran

najbolji put s obzirom na to da veći kapacitet kanala također može podrazumijevati veće zagušenje kanala radi čega bi vrijeme usmjeravanja bilo puno veće nego što bi bilo kada bi se odabrao kanal s manjim kapacitetom.

Metrikom opterećenja se opisuje zauzetost mrežnog resursa kao što je usmjerivač. Prikazuje se performansama procesora usmjerivača odnosno koliko brzo usmjerivač može obraditi zaprimljene pakete prije nego što ih dalje usmjeri.

Metrika troška uglavnom ne odražava performanse same mreže, već financijski trošak nastao korištenjem određene vrste mreže. U tom pogledu, korištenjem privatnih mreža povećao bi se put kroz koji je potrebno usmjeriti pakete, međutim usluge javnih mreža je potrebno plaćati radi čega bi to podrazumijevalo veći financijski trošak.

5.2. Protokoli usmjeravanja korišteni unutar autonomnog sustava

Prema [37], protokoli usmjeravanja koji se koriste unutar autonomnih sustava također se nazivaju IGP (eng. *Interior Gateway Protocols*). Pomoću njih, usmjerivači razmjenjuju informacije samo s onim usmjerivačima koji su dio njihovog autonomnog sustava. Primjerice, računalna mreža neke kompanije može predstavljati jedan autonomni sustav sastavljan od manjeg broja podmreža, kojeg čini skup određenog broja usmjerivača. Svi usmjerivači unutar tog autonomnog sustava dijele iste informacije tablice usmjeravanja. Primjeri tih protokola su:

- RIP (eng. *Routing Information Protocol*)
- IGRP (eng. *Interior Gateway Routing Protocol*)
- EIGRP (eng. *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol*)
- OSPF (eng. *Open Shortest Path First*)
- IS-IS (eng. *Intermediate System to Intermediate System*).

5.2.1. Routing Information Protocol

Prema [38], RIP je najpoznatiji i najstariji IGP protokol koji se koristi u lokalnim i širokopojasnim mrežama kao što je Internet iako mnogo rjeđe. Po svojoj vrsti RIP je protokol vektora udaljenosti.

Svaki usmjerivač sadrži tablicu usmjeravanja s popisom svih lokalnih ruta. Usmjerivači periodički oglašavaju informacije vlastitih tablica usmjeravanja, pri čemu istovremenu zaprimaju informacije susjednih usmjerivača. Na temelju tih informacija, usmjerivači zatim mogu ažurirati vlastite tablice usmjeravanja kako bi prilikom usmjeravanja paketa mogli odrediti koji je optimalan put prema kojem će se paket usmjeriti. Ako usmjerivač prestane distribuirati informacije svoje tablice, ostali usmjerivači će mu nakon nekog vremena prestati prosljeđivati pakete.

Svaka ruta sadrži specifičnu metriku koja je u ovom slučaju udaljenost odredišta. Svaki put kada usmjerivač zaprimi informacije određene rute, uvećava vrijednost metrike za 1. Poželjno je da vrijednost metrike udaljenosti odabrane rute bude što je manja moguća. Maksimalna udaljenost koju RIP podržava je 15, što znači da ako ta vrijednost bude 16 ili više, paket neće moći biti usmjeren.

RIP protokol sadrži određene implementacije kojima se poboljšava stabilnost algoritma. Svaki put kada usmjerivač otkrije promjenu u tablici usmjeravanja, šalje se hitna poruka ažuriranja. Time se ubrzava stabilizacija tablice usmjeravanja te sprječava pojava petlje među usmjerivačima. Nadalje, ako protokol utvrdi kako je neka ruta nedostupna, ona neće odmah biti

izbrisana iz tablice usmjeravanja. Umjesto toga, usmjerivači će nastaviti dalje slati informacije rute s vrijednošću metrike 16. To osigurava da susjedi usmjerivači budu brzo obaviješteni o nedostupnim rutama, umjesto da moraju čekati određeni period vremena.

Međutim, takva vrsta protokola nije učinkovita u velikim mrežama s obzirom na to da je dosta spora zbog svoje konfiguracije. U današnje vrijeme, RIP protokol se koristi u puno manjoj mjeri, te je uglavnom zamijenjen tehnički naprednijim protokolima kao što su OSPF (eng. *Open Shortest Path First*) i IS-IS (eng. *Intermediate System to Intermediate System*) protokoli.

5.2.2. Interior Gateway Routing Protocol

Prema [39], IGRP je stvorila tvrtka Cisco kao nadogradnja ograničenog RIP protokola. Budući da se radi o protokolu vektora udaljenosti, IGRP koristi nekoliko parametara pomoću kojih izračunava najbolji put do određenog odredišta. Ovi parametri uključuju:

- kašnjenje
- kapacitet kanala
- pouzdanost
- opterećenje
- maksimalnu transmisijsku jedinicu (MTU).

Te metrike se kombiniraju u jednu metriku, koja se prema [40] dobiva pomoću sljedeće formule:

$$METRIKA = \left[K1 * propusnost + \frac{K2 * propusnost}{256 - opterećenje} + K3 * kašnjenje \right] * \left[\frac{K5}{(pouzdanost + K4)} \right]. \quad (1)$$

Početne vrijednosti konstanti K1 i K3 su 1, a K2, K4 i K5 su 0. Ove vrijednosti je moguće definirati pomoću naredbi postavka usmjerivača, međutim prema Cisco preporuci one se ne bi trebale mijenjati jer bi se time mogla narušiti stabilnost mreže.

Vrijednost opterećenja može poprimiti bilo koju vrijednost između 1 i 255. Ukoliko bi ova vrijednost iznosila 255, link bi bio u potpunosti opterećen dok bi vrijednost 1 značila kako je link u potpunosti neopterećen. Shodno tome, kada bi opterećenje kanala iznosilo 50%, vrijednost opterećenja bi iznosila 128. Kao i opterećenje, vrijednost pouzdanosti može poprimiti vrijednosti između 1 i 255 pri čemu će 1 predstavljati najmanju pouzdanost, a 255 najveću pouzdanost.

Kapacitet kanala ovisit će o odabranoj mrežnoj tehnologiji, obzirom da svaka od njih ima različite zadane vrijednosti npr. zadana vrijednost kapaciteta Etherneta iznosi 10 Gb/s, a FDDI-a (eng. *Fiber Distributed Data Interface*) 100 Mbit/s. Prema tome, kapacitet kanala može poprimiti vrijednosti koje odražavaju brzine od 1200 b/s do 10 Gb/s.

Ukupno kašnjenje na putu moguće je izračunati zbrajanjem svih vrijednosti kašnjenja svakog pojedinog linka. Ona se iskazuje u mikrosekundama, a s obzirom na to da je kašnjenje jedna desetina ukupnog zbroja mikrosekunda, ukupni zbroj će biti potrebno podijeliti s 10.

Prema [39], kako bi se osigurala dodatna fleksibilnost, IGRP omogućuje usmjeravanje na više ruta. Dvostruke linije jednakog kapaciteta mogu se koristiti za prijenos jednog

prometnog toka koristeći *round-robin* princip s automatskim prebacivanjem na drugu liniju ako dođe do kvara na jednoj od njih. Također, sve definirane rute ne moraju nužno imati jednake vrijednosti metrika pri čemu će usmjerivač sam odabrati najbolji put ovisno o vrijednostima metrika.

IGRP koristi mnoštvo brojača vremena i varijabli pomoću kojih broji vremenske intervale te na temelju kojih će izvršavati određene funkcije. To uključuje:

- brojač vremena ažuriranja
- brojač nevažećeg vremena
- brojač razdoblja čekanja
- brojač vremenskog perioda brisanja.

Brojač vremena ažuriranja određuje koliko često treba poslati poruke o ažuriranju usmjeravanja, pri čemu zadana vrijednost IGRP protokola iznosi 90 sekundi. Brojač nevažećeg vremena određuje koliko dugo usmjerivač može čekati poruke o ažuriranju usmjeravanja prije nego što odredi kako je ta ruta nedostupna, pri čemu je zadana vrijednost tri puta veća od vremena ažuriranja. Brojač razdoblja čekanja određuje razdoblje zadržavanja, a zadana vrijednost ove varijable je tri puta veća od vremena ažuriranja uključivši dodatnih 10 sekundi. Naposljetku, brojač vremenskog perioda brisanja određuje koliko vremena treba proći prije nego što se određeni put izbriše iz tablice usmjeravanja, čija je vrijednost sedam puta veća od vremena ažuriranja.

Unatoč tome što IGRP predstavlja napredak u odnosu na RIP protokol, on je s vremenom zamijenjen s novijim protokolom imena *Enhanced IGRP*.

5.2.3. *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol*

Prema [41], EIGRP jest protokol koji je stvoren kao nasljednik prethodno navedenog IGRP protokola. Zamisao je bila stvoriti protokol kojim će se lakše prilagoditi sve većim promjenama umrežavanja uređaja kao i zahtjevima velikih širokopojasnih mreža. U svrhu toga, EIGRP je zamišljen kao hibrid protokola stanja veze i protokola vektora udaljenosti. To znači da EIGRP usmjerivač distribuira samo najbolje puteve svojim susjednim usmjerivačima kao protokol vektora udaljenosti, pri čemu stvara veze s ostalim usmjerivačima kao protokol stanja veze. Ne stvara se potpuna karta mrežne topologije, a usmjeravanje će ovisiti samo o onim informacijama koje je usmjerivač dobio od susjednih čvorišta. Informacije o promjenama topologije će se slati samo onda kada dođe do promjena, a ne u određenim vremenskim intervalima.

EIGRP usmjerivači svoj rad temelje na tri različite tablice odnosno:

- tablica susjedstva
- tablice topologije
- tablice usmjeravanja.

U tablicama susjedstva spremaju se sve informacije identificiranih susjednih usmjerivača kao što su adresa i sučelje usmjerivača. Tablica topologije sadrži informacije o svim putevima koje oglašavaju susjedni usmjerivači, pri čemu se najbolji putevi spremaju u tablicu usmjeravanja.

Osim toga, EIGRP sadrži nekoliko važnih protokola pomoću kojih se uveliko povećava operativna učinkovitost u odnosu na druge protokole usmjeravanja:

- DUAL (eng. *Diffusing Update Algorithm*)
- RTP (eng. *Reliable Transport Protocol*)
- *Protocol-dependent modul*
- *Neighbor discovery/recovery*.

DUAL je razvijen od strane dr. J.J. Garcia-Luna-Acevesa. Omogućuje EIGRP usmjerivačima mogućnost utvrđivanja pojave petlje među usmjerivačima određenog puta kao i mogućnost pronalaženja alternativnih puteva bez potreba čekanja na poruke ažuriranja ostalih usmjerivača. RTP protokol garantira dostavu paketa jednog usmjerivača prema svim njegovim susjednim usmjerivačima. Nadalje, u svrhu identifikacije svih susjednih mrežnih čvorišta, koristi se *Neighbor discovery/recovery* mehanizam. Posljednja važna značajka je *Protocol-dependent* modula pomoću kojeg se osigurava ispunjenost svih zahtjeva mrežnog sloja kao što je primjerice enkapsulacija IP paketa.

EIGRP protokol je kompatibilan te interoperabilan s IGRP usmjerivačima. To znači da mehanizam automatske redistribucije podržava uvoz IGRP ruta u EIGRP i obrnuto, čime bi se EIGRP mogao postupno integrirati u mrežu temeljenu na IGRP protokolu.

EIGRP je također vrlo jednostavno konfigurirati i koristiti, pri čemu se odlikuje velikom učinkovitošću i sigurnošću. Može se koristiti s ostalim protokolima kao što su IPv4, AppleTalk i IPX. Radi svoje modularne arhitekture, moguća je dodatna podrška ostalih protokola koji će se tek razviti u budućnosti.

5.2.4. Open Shortest Path First

Prema [42], OSPF je IGP protokol kojeg je ustanovio IETF (eng. *Internet Engineering Task Force*). Po svojoj vrsti on je protokol stanja veze, što znači da usmjerivači međusobno razmjenjuju informacije o topologiji mreže. Danas su dvije verzije u uporabi, odnosno OSPF verzija 2 (OSPFv2) koja se koristi s IPv4 protokolom, te nadograđena verzija OSPFv3 koja se koristi s IPv6 protokolom.

OSPF usmjerivači ne mjere udaljenost tj. broj čvorišta kroz koji paket mora proći do svog odredišta kao što je to kod RIP protokola, već svoje izračune temelje prema stanjima svojih veza koje mogu uključiti različite metrike kao što su kapacitet veze, kašnjenje i opterećenje. Na temelju tih metrika, svakom putu će biti dodijeljena određena vrijednost odnosno trošak pomoću kojeg će se određivati optimalni put. Na primjer, satelitska veza može imati veću troškovnu vrijednost nego što bi to bilo kod WAN veze. U korporativnim mrežama OSPF je uglavnom zamijenio zastarjeli RIP protokol.

Svaki put kad dođe do promjena u mreži, OSPF usmjerivači međusobno razmjenjuju informacije o nastalim promjenama uporabom LSA (eng. *Link State Advertisement*) poruka kako bi svaki usmjerivač mogao izraditi identičnu kartu mrežne topologije. Za razliku od RIP protokola, koji zahtijeva da usmjerivači šalju cijelu tablicu usmjeravanja susjednim usmjerivačima svakih 30 sekundi, OSPF usmjerivači šalju informacije samo u onom trenutku kada dođe do promjena, i to samo onaj dio informacija koji se promijenio. Do tih promjena može doći zbog nepredviđenog kvara opreme, a vrijeme potrebno da usmjerivač pronađe novi put između krajnjih točaka naziva se vrijeme konvergencije. Na temelju tih informacija, usmjerivači onda ponovno izračunavaju rute koristeći Dijkstrin algoritam.

Za razliku od ostalih protokola usmjeravanja, OSPF ne prenosi podatke uporabom transportnih protokola kao što su UDP ili TCP već samostalno oblikuje IP datagrame koristeći sljedeće poruke:

- *Hello* poruka koja se koristi u svrhu otkrivanja ostalih usmjerivača mreže
- DBD (eng. *Database Description*) poruka koja sadrži informacije mrežne topologije autonomnog sustava
- LSR (eng. *Link State Request*) poruke koje usmjerivači koriste kako bi zatražili od drugih usmjerivača ažurne informacije o mrežnoj topologiji
- LSU (eng. *Link State Update*) poruke koje sadrže informacije o promjenama stanja linkova
- LSAck (eng. *Link State Acknowledgment*) poruke kojima se povećava pouzdanost mreže odnosno potvrđivanje primitka LSU poruka [43].

Nadalje, ovim protokolom ostvaruje se višerazinska hijerarhija odnosno područja usmjeravanja pomoću kojih se postiže dodatna razina sigurnosti usmjeravanja kao i smanjenje prometa nastalog od protokola usmjeravanja. Poruke koje usmjerivači međusobno razmjenjuju, moraju biti autentificirane kako bi samo određeni usmjerivači mogli sudjelovati u postupku usmjeravanja paketa. Time su informacije topologije mreže skrivene od usmjerivača koji nisu dio određenog autonomnog sustava [42].

Postoje tri područja OSPF mreže kategorizirano prema funkcijama usmjerivača:

- jezgra mreže
- *stub* područje
- tranzitno područje.

Jezgra mreže povezuje sva područja u jednu cjelinu bilo to direktnim vezama ili preko drugih usmjerivača. Ona omogućuje distribuciju informacija između različitih autonomnih sustava. *Stub* područje sadrži usmjerivače koji primaju informacije o topologiji mreže samo onih autonomnih sustava u kojima se nalaze. Posljednje tranzitno područje se sastoji od dva ili više granična usmjerivača koji propuštaju promet podataka iz jednog područja u drugo područje. Ti usmjerivači ne mogu biti odredište niti izvorište neke informacije [43].

5.2.5. *Intermediate System to Intermediate System*

Prema [44], IS-IS je protokol stanja veze. Dizajniran je isključivo za CLNS mreže (eng. *Connectionless-mode Network Service*), međutim novijom inačicom, koja se također naziva Integrirani IS-IS, je podrška proširena i na IP mreže.

Svaki IS-IS usmjerivač distribuira svojim susjednim čvorištima informacije o stanjima svojih veza koristeći LSP (eng. *Link State PDU*) poruke. Informacije o stanjima veza odnose se na slobodna sučelja, trošak svakog sučelja kao i informacije o svim raspoložim susjednim usmjerivačima. Usmjerivači na temelju primljenih poruka prave identične baze podataka mrežne topologije pojedinog autonomnog sustava. Na temelju tih baza podataka računaju se putevi uporabom SPF algoritma (eng. *Shortest Path First*) ili Dijkstrinog algoritma, te stvaraju tablice usmjeravanja koje sadrže informacije o svim dostupnim odredištima. Svaki puta kada se dogodi izmjena u mrežnoj topologiji, putevi se ponovo izračunavaju kako bi se minimizirala količina prometa koju generira protokol.

Ostale mogućnosti IS-IS protokola su sljedeće:

- usmjeravanje paketa na više puteva jednakih troškovnih vrijednosti
- dvije razine hijerarhijskih područja
- mehanizam autorizacije usmjerivača pomoću kojeg bi topologija jednog područja bila skrivena od usmjerivača nekog drugo područja.

5.3. Protokoli usmjeravanja korišteni između autonomnih sustava

Prema [45], EGP protokoli su protokoli usmjeravanja koje autonomni sustavi koriste u svrhu međusobne komunikacije. Za razliku od IGP protokola koji razmjenjuju informacije o vezama unutar autonomnog sustava, EGP protokoli razmjenjuju podatke dostupnosti odnosno informacije o mrežama s kojim autonomni sustav može ostvariti komunikaciju. Primjeri tih protokola su:

- EGP protokol (eng. *Exterior Gateway Protocol*)
- BGP protokol (eng. *Border Gateway Protocol*).

5.3.1. Exterior Gateway Protocol

Prema [41], EGP protokol je bio korišten u svrhu prenošenja informacija između autonomnih sustava. On se danas više ne koristi te je u potpunosti zamijenjen s BGP protokolom. Razvijen je 1980. godine od strane tvrtke BBN *Technologies*.

Protokol je moguće podijeliti na tri komponente:

- *Neighbor Acquisition* protokol
- *Neighbor Reachability* protokol
- *Network Reachability determination*.

Prije nego što EGP usmjerivači mogu razmjenjivati informacije o usmjeravanju, svaki usmjerivač mora definirati s kojim čvorištima će te podatke razmjenjivati. To se postiže postupkom prikupljanja susjednih čvorova. Kada usmjerivač želi ostvariti vezu s nekim drugim usmjerivačem, poslat će *Neighbor Acquisition* zahtjev svakih 30 sekundi, sve dok ciljani usmjerivač ne odgovori. Zahtjev će sadržavati identifikacijski broj koji će biti preslikan u odgovor kako bi usmjerivač znao odrediti koji odgovor se odnosi na koji zahtjev. Usmjerivač koji prima zahtjev mora odgovoriti na zahtjev kako bi izvorišni usmjerivač znao može li ostvariti s njim komunikaciju. Ako želi uspostaviti vezu, odredišni usmjerivač poslat će odgovor zajedno sa vlastitim zahtjevom, a ukoliko ne želi uspostaviti vezu odgovorit će porukom odbijanja.

Nakon što se ostvari komunikacija između dva usmjerivača različitih autonomnih sustava, potrebno je periodički provjeravati dostupnost veze. Ako jedan usmjerivač zaključi kako drugi usmjerivač nije dostupan, prema njemu će prestati usmjeravati sav daljnji promet. To se provodi *Neighbor Reachability* protokolom uz pomoć dvije različite poruke, odnosno izvorišni usmjerivač šalje odredišnom usmjerivaču „*Hello*“ poruku na temelju koje bi on morao odgovoriti sa „*I Heard You*“ porukom. Vremenski razmak tih dviju poruka bi morao biti manji od nekoliko sekundi.

Network Reachability protokol se koristi kako bi usmjerivači dvaju različita autonomna sustava mogli definirati put, odnosno prvi skok, putem kojeg će se komunikacija odvijati.

Nedostatak ove vrste protokola je taj što je on namijenjen topologiji stabla, te ukoliko bi se koristio u bilo kojoj drugoj mrežnoj topologiji, protokol ne bi sadržavao dovoljno

informacija potrebnih za pravilno usmjeravanja što bi dovelo do pojave beskonačne petlje usmjeravanja. Nadalje, usmjerivači bi time mogli distribuirati pogrešne informacije o susjednim čvorištima koji više nisu dostupni, čime usmjereni promet nikad ne bi bio dostavljen na svoje odredište.

5.3.2. Border Gateway Protocol

Prema [46], BGP protokol je protokol vektora udaljenosti, a koristi se prilikom međusobnog povezivanja pružatelja internetskih usluga (eng. *Internet service providers*) te prilikom povezivanja većih korisničkih mreža i pružatelja internetskih usluga. BGP omogućava usmjerivačima slanje paketa prema ostalim mrežama na Internetu, a u slučaju kvara jedne veze s Internetom, BGP stvara novu vezu čime se ostvaruje određeni stupanj stabilnosti mreže.

Usmjeravanje se provodi na temelju standardnih tablica usmjeravanja te posebnih RIB (eng. *Routing information base*) baza podataka pohranjenih na BGP usmjerivačima. RIB sadrži informacije o putevima lokalnih i eksternih čvorišta, a koristi se u svrhu ažuriranja informacija tablica usmjeravanja. To znači da RIB sadrži informacije o svim mogućim putevima koji ne moraju nužno biti iskorišteni. Ukoliko bi usmjerivač primio informaciju o nedostupnosti nekog puta čije su informacije skladištene samo unutar RIB baze podataka, informacije o istoj bi se izbrisale iz RIB-a, bez potrebe ažuriranja tablice usmjeravanja.

U svrhu distribuiranja informacija tablice usmjeravanja koristi se klijentsko – poslužiteljska mehanika na temelju koje čvorišta pokreću BGP sesije s odgovarajućim poslužiteljima. BGP usmjerivači distribuiraju informacije tablica usmjeravanja samo onda kada se dogode promjene u topologiji mreže, i to samo one informacije koje su se promijenile. S obzirom na to da BGP protokol nema automatski mehanizam otkrivanja čvorišta, veze prema usmjerivačima i adrese usmjerivača moraju biti ručno postavljenje.

Odluke o najboljim putevima donose se na temelju parametara usmjeravanja koji se također nazivaju atributi usmjeravanja. Prema [47], neki od važnijih atributa usmjeravanja BGP protokola su sljedeći:

- *Origin* atribut, na temelju kojeg se određuje podrijetlo dobivenih informacija tablice usmjeravanja.
- *Next_hop* atribut, kojim se specificira adresa sljedećeg čvorišta prema kojem će paket biti prosljeđen.
- *AS_path* atribut pomoću kojeg se opisuje kompletni put autonomnog sustava kroz koji bi paket morao proći kako bi došao do svog odredišta.
- *Multi-exit discriminator* atribut, pomoću kojeg ISP-ovi određuju čvorišta koja će imati veći prioritet prilikom usmjeravanja paketa.
- *Communities* atribut, koji se odnosi na oznake pomoću kojih će ISP-ovi kontrolirati način na koji usmjerivači oglašavaju svoje rute i mnogi drugi atributi.

U situacijama u kojima je dostupno više putova prema odredišnom usmjerivaču, BGP protokol bira onu rutu koja je najbolja prema definiranim metrikama.

Postoje dvije vrste BGP protokola, odnosno IBGP (eng. *Interior Border Gateway Protocol*) koji se koristi unutar jednog autonomnog sustava te EBG (eng. *External Border Gateway Protocol*) koji se koristi između više autonomnih sustava. Nedostatak IBGP protokola

jest taj što sva čvorišta mreže moraju biti međusobno povezana jedan s drugim, što u slučaju velikih mreža može dovesti do degradacije performansi usmjerivača.

BGP protokol je vrlo trom protokol zbog velikih tablica usmjeravanja koje mogu sadržavati više od 100 000 puteva, međutim zbog toga nije potrebno često računati puteve u slučaju kvara jednog puta [48].

6. Komparativne značajke protokola usmjeravanja i usporedba protokola

6.1. Značajke protokola usmjeravanja

Protokole usmjeravanja moguće je usporediti na temelju karakterističnih značajki. Osim spomenutih značajki u prethodnim poglavljima ovoga rada kao što su vrsta algoritma, metrike protokola i maksimalan broj skokova, postoje još neke značajke temeljem kojih se mogu uspoređivati protokoli usmjeravanja. Te značajke su, prema [49], sljedeće:

- Segmentacija podsustava – Ovisno o korištenom protokolu usmjeravanja, autonomni sustavi mogu biti dalje segmentirani na manja područja [49].
- Integritet – S obzirom na to da usmjerivači međusobno distribuiraju informacije o korištenim rutama, oni mogu biti podložni različitim napadima od strane trećih osoba. To može uključiti različite opasnosti kao što je narušavanje privatnosti prenesenih podataka ili narušavanje uspostavljenih veza između susjednih čvorišta čime se nepotrebno terete resursi usmjerivača. Stoga je potrebno je uspostaviti različite metode sigurnosti kako ne bi bio narušen integritet usmjerenih podataka i samih mrežnih resursa [50].
- Korišteni protokoli te broj porta – Odnosi se na dodatnu vrstu protokola koja može biti korištena kao što je primjerice UDP ili TCP i njihovi pripadajući brojevi portova [49].
- Veličina mreže – Razmjer telekomunikacijske mreže igra veliku ulogu prilikom odabira protokola usmjeravanja s obzirom na to da nije svaki protokol namijenjen korištenju u većim ili manjim mrežama.
- Brzina konvergencije – Konvergencija je naziv usklađenosti susjednih usmjerivača. Usklađenost se postiže prikupljanjem svih raspoloživih informacija o mrežnoj topologiji za svaki povezani usmjerivač u mreži. Informacije distribuiraju svi usmjerivači, a one moraju održavati stvarno stanje mreže. Zamisao je da svaki usmjerivač sadrži identičnu mapu mrežne topologije. U svrhu toga, koristi se značajka brzina konvergencije kojoj je glavni cilj prikazati koliko je protokol uspješan u tome da brzo i pouzdano konvergira mrežne usmjerivače. U tom pogledu važnu ulogu može igrati i veličina mreže s obzirom na to da se veće mreže sporije konvergiraju od manjih mreža [51].
- Arhitektura adresiranja – Arhitektura adresiranja može se podijeliti na klasni (eng. *Classfull*) i besklasni (eng. *Classless*) način adresiranja. Prema klasnom načinu adresiranja mrežna maska dodjeljuje se na temelju IP klase čime bi se rezervirao veći mrežni opseg nego što je to potrebno. U slučaju besklasnih adresa, mrežna maska je varijabilna radi čega podmreže mogu koristiti samo onaj broj bitova koji im je potreban. Prema tome, protokole usmjeravanja moguće je razlikovati prema načinu adresiranja koje oni podržavaju [52].
- Učestalost ažuriranja tablica usmjeravanja – U kojoj mjeri će tablice ažuriranja biti konvergirane također ovisi o učestalosti njihovog ažuriranja. Ovisno o korištenom protokolu, one se mogu ažurirati periodički ili onda kada dođe do promjene.

6.2. Usporedba protokola usmjeravanja

Usporedba protokola usmjeravanja prikazana je tablicom 3 na temelju komparativnih značajki spomenutih u poglavlju 6. U usporedbu nije uključen EGP protokol s obzirom na to da se on danas ne koristi.

Od analiziranih protokola, dva protokola su temeljena na algoritmu vektora udaljenosti odnosno RIP i IGRP, dok su OSPF i IS-IS protokoli stanja veze. Istaknuti su EIGRP protokol koji je hibrid s obzirom na to da ima karakteristike i vektora udaljenosti i protokola stanja veza, te BGP koji koristi *Best Path vector* algoritam na temelju kojeg sam odabire s kojim usmjerivačima će ostvariti komunikaciju, a s kojim neće.

Način na koji protokoli računaju optimalne puteve ovisit će o korištenim metrikama. Najmanje metrika koristi RIP protokol koji koristi samo metriku broja skokova. Svi ostali protokoli imaju razvijene formule pomoću kojih se kombinira više metrika u svrhu dobivanja jedne konačne metrike. BGP protokol uz metriku skoka koristi specifične attribute na temelju kojih određuje najbolji put poput *Origin* atributa i *Next_hop* atributa.

Izuzevši protokole koji ne koriste metriku broja skokova, najmanji broj skokova ima RIP protokol, dok maksimalna vrijednost skokova svih ostalih protokola iznosi 255.

Protokoli koji segmentiraju autonomni sustav na manja područja su OSPF i IS-IS protokoli.

S obzirom na to da integritet prenesenih podataka, jedini protokol koji ne podržava provjeru autentičnosti jest IGRP protokol. U RIP protokol ta značajka je uvedena s verzijom 2, a u svim ostalim protokolima ona je već bila implementirana.

U pogledu prijenosa podataka, većina protokola izravno koristi IP protokol različitih brojeva priključnica prikazanih na tablici 3. Izuzetci su RIP protokol kod kojeg su poruke enkapsulirane u UDP segmente, te BGP protokol čije se poruke enkapsuliraju u TCP segmente.

U pogledu na veličinu mreže, za male mreže moguće je koristiti RIP i IGRP protokol. Kod srednje velikih mreža moguće je koristiti OSPF i EIGRP protokole pri čemu je razlika u tome što EIGRP može koristiti samo Cisco usmjerivače, dok OSPF može koristiti usmjerivače različitih proizvođača. Za velike mreže najbolji je IS-IS protokol. BGP protokol povezuje veći broj autonomnih sustava.

Prema [53], navode se teoretske maksimalne vrijednosti vremena konvergencije. Protokol s najsporijom konvergencije je BGP protokol i ona iznosi 85 sekundi. Razlog tome je što se pomoću njega prenose velike količine podataka što kod ostalih protokola nije slučaj. Što se tiče ostalih protokola, RIP i IGRP imaju najsporiju konvergenciju. Konvergencija RIP protokola postojećih ruta iznosi 25 sekundi, međutim kod novijih ruta ona iznosi 85 sekundi. Porast mreže dodatno usporava njegovu konvergenciju. U odnosu na njega OSPF protokol šalje LSA poruke onog trenutka kada ih primi, pri čemu vrijeme konvergencije iznosi 35 sekundi. Protokoli s najkraćom konvergencijom su EIGRP i IS-IS protokoli. EIGRP je karakteriziran konvergencijom od 25 sekundi, a IS-IS protokol s konvergencijom od 35 sekundi [53].

Jedini protokol korišten između autonomnih sustava jest BGP protokol, dok su svi ostali korišteni za usmjeravanja prometa unutar jednog autonomnog sustava.

Jedini protokol koji danas koristi klasni način adresiranja je IGRP, dok svi ostali protokoli podržavaju besklasni način adresiranja. Iako prva verzija RIP protokola nije podržavala besklasno adresiranje, ono je implementirano s RIP verzijom 2.

Protokoli koji ažuriraju svoje tablice periodički su RIP i IGRP protokol. EIGRP koristi DUAL algoritam kako bi pronašao alternativne puteve bez potrebe na čekanju poruka ažuriranja ostalih usmjerivača. Kod svih ostalih protokola usmjeravanja, informacije o ažuriranju tablice usmjeravanja razmjenjuju se samo onda kada se dogodi promjena u topologiji mreže.

Tablica 3. Usporedni prikaz značajki protokola usmjeravanja.

	RIP	IGRP	EIGRP	OSPF	IS-IS	BGP
Algoritam	Protokol vektora udaljenosti	Protokol vektora udaljenosti	Hibridni protokol	Protokol stanja veze	Protokol stanja veze	<i>Best path vector</i> protokol
Metrika	Broj skokova	Kašnjenje, kapacitet, pouzdanost i opterećenje	Kašnjenje, kapacitet, pouzdanost i opterećenje	Trošak, kapacitet kanala	Cijena puta	Koristi specifične attribute
Maksimalan broj skokova	15	255	255	/	/	255
Segmentacija podsustava	Nema segmentacije	Nema segmentacije	Nema segmentacije	Segmentacija AS na manja područja	Segmentacija AS na manja područja	/
Integritet	Provjera autentičnosti dodana tek u RIP v2	Ne podržava provjeru autentičnosti	Podržava provjeru autentičnosti	Podržava provjeru autentičnosti	Podržava provjeru autentičnosti	Podržava provjeru autentičnosti
Protokol i broj porta	UDP 520	IP 9	IP 88	IP 89	IP 124	TCP 179
Veličina mreže	Male mreže	Male i velike mreže	Srednje velike mreže	Srednje velike mreže	Velike mreže	Povezuje veći broj autonomnih sustava
Brzina konvergencije	Spora konvergencija	Spora konvergencija	Brza konvergencija	Konvergencija brža od RIP-a	Brza konvergencija	Spora konvergencija
Upotreba	IGP	IGP	IGP	IGP	IGP	EGP
Arhitektura adresiranja	<i>Classfull/Classless</i>	<i>Classfull</i>	<i>Classless</i>	<i>Classless</i>	<i>Classless</i>	<i>Classless</i>
Učestalost ažuriranja tablica	Periodički	Periodički	DUAL algoritam	Pri nastajanju promjena	Pri nastajanju promjena	Pri nastajanju promjena

Izvor: [49]

7. Zaključak

Telekomunikacije predstavljaju sustav ili proces prijenosa, odašiljanja ili prijema poruka, riječi, slika, zvuka te bilo kakvih drugih informacija na daljinu u obliku elektroničkih signala. Temelj tog sustava je telekomunikacijska infrastruktura sastavljena od mrežnih čvorišta i transmisijskih linkova. Osnovna uloga koju obavljaju čvorišta telekomunikacijske mreže jest komutacija odnosno postupak uspostavljanja individualne veze, na zahtjev, od željenog ulaza do željenog izlaza dokle god to zahtijeva prijenos informacija.

Komutiranje informacija može biti izvedeno komutiranjem kanala i komutacijom informacijskog paketa. Ovaj završni rad obrađivao je mreže koje koriste komutaciju informacijskog paketa. Komutacijom paketa, informacije se dijele u niz manjih segmenata koji se u sklopu paketa šalju do svog odredišta. Međutim, kako bi paketi mogli biti poslani od jednog čvora odnosno usmjerivača, do drugog usmjerivača, bit će potrebno koristiti mrežne protokole koji će odrediti način na koji će usmjerivači međusobno komunicirati.

Mrežne protokole koje koriste usmjerivači su protokoli usmjeravanja odnosno protokoli koji omogućuju usmjerivačima dinamičko oglašavanje i učenje dostupnih ruta, te usmjereni protokoli tj. podaci koji se prenose između usmjerivača. Protokoli svoj rad temelje na algoritmima usmjeravanja odnosno skupovima postupaka pomoću kojih se određuje najbolji put po kojem će paketi biti poslani. Različite vrste algoritama su: statički i dinamički, algoritmi s jednom ili više ruta, jednorazinski i hijerarhijski, usmjeravanje na izvorišnom čvoru i usmjeravanje na svim usmjerivačima, algoritmi usmjeravanja unutar domene i među domenama, algoritam stanja veze i algoritam vektora udaljenosti te najpoznatiji Dijkstrin algoritam, Bellman-Ford algoritam i Floyd-Warshall algoritam.

Osim algoritama usmjeravanja, protokoli koriste različite metrike na temelju kojih će se odabirati najbolji put po kojem će paketi putovati do svog odredišta. Neke od metrika su duljina puta, pouzdanost, kašnjenje, kapacitet kanala, propusnost, opterećenje te trošak.

Same protokole usmjeravanja moguće je podijeliti na one korištene unutar jednog autonomnog sustava i one protokole korištene između više autonomnih sustava. Prvi najpoznatiji i najstariji protokol koji se koristi unutar autonomnog sustava je *Routing Information Protocol* koji je po svojoj vrsti protokol vektora udaljenosti, a koristi metriku skoka. On je danas uglavnom zamijenjen tehnički naprednijim protokolima kao što su *Open Shortest Path First* i *Intermediate System to Intermediate System*.

Open Shortest Path First je protokol stanja veze u kojem usmjerivači međusobno razmjenjuju informacije o topologiji mreže. Stanje mreže odnosi se na metrike kao što su kapacitet veze, kašnjenje i opterećenje. Na temelju tih metrika, svakom se putu dodjeljuje određena vrijednost troška pomoću kojeg se određuje optimalni put.

Intermediate System to Intermediate System je također protokol stanja veze, što znači da usmjerivači razmjenjuju informacije o stanjima veze kao što su slobodna sučelja te trošak svakog sučelja. IS-IS također omogućuje usmjeravanja paketa prema više puteva jednakih troškovnih vrijednosti, dvije razine hijerarhijskih područja te mehanizam autorizacije.

Interior Gateway Routing Protocol je stvoren kao nasljednik RIP protokola te je po svojoj vrsti također protokol vektora udaljenosti. Najbolji put računa se pomoću formule koja uključuje različite metrike kao što su kašnjenje, kapacitet kanala, pouzdanost, opterećenje i

maksimalna transmisijska jedinica. On je također s vremenom zamijenjen drugim protokolom imena *Enhanced IGRP*. To je protokol koji je stvoren kako bi se prilagodio svim većim promjenama umrežavanja uređaja, a po svojoj vrsti je hibrid protokola stanja veze i protokola vektora udaljenosti. To znači da distribuira samo najbolje puteve svojim susjednim usmjerivačima, pri čemu također stvara veze s ostalim usmjerivačima.

Protokoli korišteni između autonomnih sustava su *Exterior Gateway Protocol* i *Border Gateway Protocol*. *Exterior Gateway* protokol je danas u potpunosti uklonjen iz upotrebe te se umjesto njega koristi BGP protokol. EGP je sadržavao tri funkcije pomoću kojih je pronalazio čvorove susjednih autonomnih sustava, provjeravao njihovu dostupnost te terminirao veze u slučaju nedostupnosti. Nedostatak ovog protokola je bio taj što je njegova uporaba bila ograničena samo na mrežnu topologiju stabla.

Border Gateway protokol je protokol vektora udaljenosti a koristi se za međusobno povezivanje pružatelja internetskih usluga te prilikom povezivanja većih korisničkih mreža i pružatelja internetskih usluga. To je vrlo trom protokol s obzirom na to da rukuje velikim tablicama usmjeravanja koje mogu sadržavati više od 100 000 puteva, radi čega nije potrebno često računati puteve u slučaju kvara jednog puta.

Značajke na temelju kojih su protokoli uspoređivani u ovom radu su vrsta algoritma, korištene metrike, segmentacija sustava, integritet, dodatni korišteni protokoli i broj porta, veličina mreže u kojoj se koriste, brzina konvergencije, arhitektura adresiranja te učestalost ažuriranja tablica usmjeravanja.

Popis literature

1. Mrvelj Š. Predmet proučavanja i temeljni pojmovi. (Nastavni materijali kolegija Tehnologija telekomunikacijskog prometa 1.)
2. Wikipedia. Preuzeto sa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Telecommunication> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
3. Computer Network Simplified. Preuzeto sa: <http://computernetworkingsimplified.in/wp-content/uploads/2013/08/wiredcables.jpg> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
4. Lovrek I. Telekomunikacije - tehnologija i tržište. Zagreb: Element; 2007.
5. Husnjak S. Općenito o terminalnim uređajima u informacijsko-komunikacijskom prometu. (Nastavni materijali kolegija Terminalni uređaji.)
6. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Circuit_switching [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
7. Mrvelj Š. Telefonska mreža. (Nastavni materijali kolegija Tehnologija telekomunikacijskog prometa 1.)
8. CallFire. Preuzeto sa: <https://www.callfire.com/help/glossary/communications/circuit-switched-network> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
9. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Packet_switching [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
10. Mrvelj Š. Komutacijski i transmisijski sustavi podatkovne mreža. (Nastavni materijali kolegija Tehnologija telekomunikacijskog prometa 1.)
11. CARNet. Preuzeto sa: <https://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/CCERT-PUBDOC-2007-02-183.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
12. Wikipedia. Preuzeto sa: https://hr.wikipedia.org/wiki/Internetski_protokol [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
13. Mrvelj Š. Komutacijski i transmisijski sustavi paketne mreže. (Nastavni materijali kolegija Tehnologija telekomunikacijskog prometa 1.)
14. System Administration Guide: IPServices. Preuzeto sa: <https://docs.oracle.com/cd/E19253-01/816-4554/816-4554.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
15. Forenbacher I. Funkcionalnosti i arhitektura IP usmjerivača. (Nastavni materijali kolegija Komutacijski procesi i sustavi.)
16. Schmidt T. Routing and Packet Forwarding. Preuzeto sa: http://lxmayr1.informatik.tu-muenchen.de/konferenzen/Ferienakademie08/talks/tina_schmidt/paper_schmidt_tina_routing_and_packet_forwarding.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
17. Farhadi Z. Implementation of Multiple Routing Tables in Software Routers. 2017; 0499-500.
18. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Routing_loop_problem [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
19. Wikipedia. Napravljeno prema slici sa Interneta. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Routing_loop_problem#/media/File:Drawing1rlp.jpg. [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
20. SearchNetworking. Preuzeto sa: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/routing-table> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]

21. Computer Hope. Preuzeto sa: <https://www.computerhope.com/jargon/r/routing-algorithm.htm> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
22. Cisco. Preuzeto sa: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=2180210&seqNum=5> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
23. Banner R, Orda A. Multipath Routing Algorithms for Congestion Minimization. 2005,1-2.
24. Computer Networks (CS425). Preuzeto sa: <https://www.cse.iitk.ac.in/users/dheeraj/cs425/lec12.html> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
25. Ecomputer Notes. Preuzeto sa: <http://ecomputernotes.com/computernetworkingnotes/routing/hierarchical-routing> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
26. The Computer Technology Documentation Project. Preuzeto sa: <http://www.comptechdoc.org/independent/networking/terms/source-routing.html> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
27. Zhang M. On the State of the Inter-domain and Intra-domain Routing Security. 1-2.
28. TechDifferences. Preuzeto sa: <https://techdifferences.com/difference-between-distance-vector-routing-and-link-state-routing.html> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
29. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
30. Hackernoon. Napravljeno prema slici sa Interneta. Preuzeto sa: <https://hackernoon.com/how-to-implement-dijkstras-algorithm-in-javascript-abdfd1702d04> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
31. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Bellman-Ford_algorithm [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
32. Havaš L, Keček D, Knez K. Usporedba i primjena „distance vector“ i „link state“ mrežnih protokola. 2013, Tehnički glasnik 7, 108-115
33. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Floyd-Warshall_algorithm [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
34. Programming-Algorithms. Preuzeto sa: <http://www.programming-algorithms.net/article/45708/Floyd-Warshall-algorithm> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
35. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Routing_protocol [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
36. Cisco. Cisco Nexus 7000 Series NX-OS Unicast Routing Configuration Guide, Release 4.x. Preuzeto sa: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/datacenter/sw/4_2/nx-os/unicast/configuration/guide/l3_cli_nxos/l3_overview.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
37. Graziani R., Johnson A. Routing Protocols and Concepts. Indianapolis: Cisco Press; 2011.
38. Metaswitch. Preuzeto sa: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-routing-information-protocol-rip> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
39. Cisco. Preuzeto sa: http://docwiki.cisco.com/wiki/Interior_Gateway_Routing_Protocol [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
40. Boney J. Cisco IOS in a Nutshell. Sebastopol: O'Reilly & Associates Inc.; 2002.

41. Cisco. Preuzeto sa:
http://docwiki.cisco.com/wiki/Enhanced_Interior_Gateway_Routing_Protocol
 [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
42. Search Enterprise WAN. Preuzeto sa:
<https://searchenterprisewan.techtarget.com/definition/OSPF> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
43. Wikipedia. Preuzeto sa: https://en.wikipedia.org/wiki/Open_Shortest_Path_First
 [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
44. Metaswitch. Preuzeto sa: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-intermediate-system-to-intermediate-system-isis>
 [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
45. Cisco. Preuzeto sa:
<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=24090&seqNum=5> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
46. SearchTelecom. Preuzeto sa: Izvor:
<https://searchtelecom.techtarget.com/definition/BGP> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
47. Netcerts.net. Preuzeto sa: <http://www.netcerts.net/bgp-path-attributes-and-the-decision-process/> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
48. Grgurević I. Značajke i načini rada protokola za usmjeravanje. Prezentacija kolegija Komutacijski procesi i sustavi
49. Mitra D, Sarkar S, Hati D. A Comparative Study of Routing Protocols. 2016; 49-50.
50. Cisco. Preuzeto sa:
https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Security/Baseline_Security/securebasebook/sec_chap3.html. [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
51. Wikipedia. Preuzeto sa: [https://en.wikipedia.org/wiki/Convergence_\(routing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Convergence_(routing))
 [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
52. Networking Concepts. Preuzeto sa:
<http://networkingconcepts4u.blogspot.com/2008/09/classful-vs-classless-address.html>
 [Pristupljeno: kolovoz 2018.]
53. MPLSVPN. Preuzeto sa: <http://www.mplsvpn.info/2015/03/convergence-delay-of-routing-update-for.html> [Pristupljeno: kolovoz 2018.]

Popis ilustracija

Slika 1. Primjeri prijenosnih medija [3].....	2
Slika 2. Proces prijenosa informacija u mreži s komutacijom kanala.	4
Slika 3. Proces prijenosa informacija u mreži s komutacijom paketa.	5
Slika 4. Prikaz problema beskonačne petlje.	9
Slika 5. Struktura hijerarhije mreže.	13
Slika 6. Stablo usmjeravanja za par čvorova 8 (polazni čvor) - 2 (odredišni čvor) kada samo polazni čvor ima mogućnost odluke.....	14
Slika 7. Stablo usmjeravanja za par čvorova 8 (polazni čvor) - 2 (odredišni čvor) kada svaki čvor ima mogućnost odluke.	14
Slika 8. Inter-domain usmjeravanje i intra-domain usmjeravanje.	15
Slika 9. Primjer korišten u svrhu računanja najkraćeg puta koristeći Dijkstrin algoritam.	16
Slika 10. Dijagram toka Dijkstrinog algoritma.....	17
Slika 11. Dijagram toka Bellman-Ford algoritma.....	18
Slika 12. Graf nad kojim je izvršen Floyd-Warshall algoritam.	19

Popis tablica

Tablica 1. Nulta iteracija Floys-Washallow algoritma.....	19
Tablica 2. Posljednja iteracija Floyd-Warshallow algoritma.	19
Tablica 3. Usporedni prikaz značajki protokola usmjeravanja.	32

Popis kratica

PSTN	Public switched telephone network
ITU	International Telecommunication Union
GPRS	General Packet Radio Service
IP	Internet Protocol
DECnet	Digital Equipment Corporation
XNS	Xerox Network Systems
Banyan VINES	Banyan Virtual Integrated Network Service
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
ARP	Address Resolution Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IGMP	Internet Group Management Protocol
RIP	Routing Information Protocol
IGRP	Interior Gateway Routing Protocol
EIGRP	Enhanced Interior Gateway Routing Protocol
OSPF	Open Shortest Path First
IS-IS	Intermediate System to Intermediate System
EGP	Exterior Gateway Protocol
BGP	Border Gateway Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
TTL	Time to live
MTU	Maximum transmission unit
MPLS	Multiprotocol Label Switching
ECMP	Equal Cost Multipath
AS	Autonomous System
BER	Bit error rate
IGP	Interior gateway protocol

DUAL	Diffusing update algorithm
RTP	Real-time Transport Protocol
IPX	Internetwork Packet Exchange
IETF	Internet Engineering Task Force
WAN	Wide Area Network
LSA	Link-state advertisement
DBD	Database Description
LSR	Link State Request
LSU	Link State Update
LSAck	Link State Acknowledgment
AS	Autonomous system
CLNS	Connectionless-mode Network Service
PDU	Protocol data unit
LSP	Link State Protocol Data Unit
SPF	Shortest Path First
RIB	Routing information base
IBGP	Internal Border Gateway Protocol
EBGP	External Border Gateway Protocol